

Laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von
Frau Dipl.-Ing. Nataliya Vorbringer-Dorozhovets
geboren am 15.01.1980 in Lviv, Ukraine

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. mult. Gerd Jäger,
Technische Universität Ilmenau
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska,
Technische Universität Ilmenau
3. Prof. Dr. sc. nat. Dr.-Ing. E. h. Wolfgang Osten,
Universität Stuttgart

eingereicht am:	4. Dezember 2018
verteidigt am:	14. Juni 2019

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000417

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der Technischen Universität Ilmenau.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Grünwald, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich und Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske für die Unterstützung meiner Arbeit und die exzellenten Arbeitsbedingungen im Institut. Mein besonderer Dank geht an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger für die Überlassung dieses interessanten Forschungsthemas und die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Das Forschungsthema “Laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop” wurde zuerst im Rahmen einer Zusammenarbeit durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) gefördert. An dieser Stelle bedanke ich mich ganz herzlich für diese Unterstützung.

Herzlich danken möchte ich auch Herrn Prof. Stadnyk Bogdan Iwanowych, Leiter des Fachgebietes für Informations- und Messtechnologien der Nationalen Universität “Lvivska Polytechnika”, Lviv, Ukraine, dessen Unterstützung ich immer hatte.

An dieser Stelle möchte ich jetzigen und ehemaligen Kollegen des Institutes und unserer Arbeitsgruppe für die sehr gute Zusammenarbeit danken. In zahlreichen wissenschaftlichen Gesprächen und Diskussionen wurden mir immer neue Ideen bei der Lösung der Probleme meiner Forschung vermittelt. Mein besonderer Dank gilt meinem ehemaligen Kollegen Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte für die fachliche Begleitung. Den Kollegen der SIOS Meßtechnik GmbH danke ich ebenfalls für umfangreiche technische Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und Schwiegereltern, meinem Mann Matthias, meiner Familie in der Ukraine und in Deutschland für die Unterstützung und Johanna und Katharina für ihr Verständnis.

Erfurt, den 4. Dezember 2018.

Nataliya Vorbringer-Dorozhovets

Kurzfassung

Seit der Entwicklung im Jahr 1986 ermöglicht das Rasterkraftmikroskop (AFM) den Blick in die Nanowelt. Das Funktionsprinzip des AFM basiert auf Detektion der interatomaren Wechselwirkung zwischen abzubildender Oberfläche und einer pyramidenförmigen Spitze mit einem Radius von wenigen Nanometern. Die Spitze ist am freien Ende eines *Cantilevers* angebracht. Die durch die Wechselwirkungskräfte verursachte Auslenkung des *Cantilevers* wird mit einem Lagedetektor erfasst. Im AFM wird die Antastspitze über die Messobjektoberfläche geführt und die Oberfläche wird währenddessen abgetastet, ähnlich wie bei einem Schallplattenspieler die Nadel des Tonabnehmers die Platte abtastet. Der Lagedetektor liefert dabei ein Signal, das mit der Topographie der Oberfläche zusammenhängt. Die zu jedem einzelnen Messpunkt erfassten Messwerte werden zu einem "Bild" zusammengesetzt. Von Beginn an dienten AFM für die bildliche Darstellung von Nanostrukturen. Der heutige technologische Fortschritt erfordert metrologisch exakte Objektvermessung mit Nanometergenauigkeit über große Messbereiche. Solche Messungen sind nur möglich, wenn die Mess- und Positioniersysteme gute messtechnische Eigenschaften aufweisen und auf nationale und internationale Normale rückführbar sind. Dies war der Ausgangspunkt zur Entwicklung eines laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM), welches als Antastsystem für die Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPMM) NMM-1 dienen soll.

Das Hauptmerkmal des LiAFM ist der kombinierte Lagedetektor für die Messung der Torsion, Biegung und Position des *Cantilevers* mit einem einzigen Messstrahl. Dieser kombinierte Lagedetektor schließt einen Lichtzeiger und ein Interferometer ein und wird im LiAFM als interferometrisches Sondenmesssystem bezeichnet. Das Laserinterferometer ermöglicht die Rückführbarkeit der Positionsmessung auf das Längennormal. Der Lichtzeiger zeichnet sich von anderen Lagedetektoren durch die gleichzeitige und getrennte Erfassung von Biegung und Torsion des *Cantilevers* aus. Die NMM-1 führt bei einer Messung die Scanbewegung durch, somit ist für das LiAFM ein x - y -Scanner nicht erforderlich. Um die Messdynamik und den Messbereich des LiAFM zu erhöhen ist ein piezoelektrischer z -Antrieb integriert. Während der Messungen wird eine interferometrische Positionsmessung sowie eine hochgenaue Regelung der Durchbiegung des *Cantilevers* (mittels z -Antriebes und Biegungssignals des Lichtzeigers) durchgeführt und die Kombination der Bewegungen von NMM-1-Tisch und z -Antrieb des LiAFM verwendet.

Das LiAFM wurde erfolgreich aufgebaut, in die NMM-1 integriert und für zahlreiche Messaufgaben eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit wird dieses neuartige LiAFM, seine besonderen Merkmale, die Funktionsweise, der Aufbau, die messtechnischen Eigenschaften sowie die wichtigsten Messungen und deren Ergebnisse ausführlich dargestellt.

Abstract

Since its development in 1986, the atomic force microscope (AFM) has provided an insight into the nanoworld. The functional principle of the AFM is based on the detection of the interatomic interaction between the surface to be imaged and a pyramid-shaped tip with a radius of a few nanometres. The tip is attached to the free end of the *cantilever*. The deflection of the *cantilever* caused by the interaction forces is detected by a position detector. In the AFM, the tip is guided over the measuring surface and the surface is scanned during this process, similar to the needle of the pickup in a record player. The position detector provides a signal related to the topography of the surface. The measured values recorded at each measuring point are combined to an “image”. AFM have been used from the beginning for the visual representation of nanostructures. Today's technological progress requires metrologically exact object measurement with nanometre precision over large measuring ranges. Such measurements are only possible if the measuring and positioning systems have good metrological properties and are traceable to national and international length standards. This was the initial point for the development of a laserinterferometric atomic force microscope (LiAFM), to be used as a probing system for the nanopositioning and nanomeasuring machine (NPM) NMM-1.

The main feature of the LiAFM is the combined position detector for measurement of the torsion, bending and position of the *cantilever* with a single laser beam. This combined position detector includes an optical lever and an interferometer and is referred in LiAFM as an interferometric probe measuring system. The laser interferometer enables the traceability of the position measurement to the length standard. The optical lever differs from other position detectors by simultaneous and separate detection of bending and torsion of the *cantilever*. The NMM-1 performs the scanning motion during a measurement, so an x - y -scanner is not required for the LiAFM. To increase the measuring dynamics and the measuring range of the LiAFM a piezoelectric z -actuator is integrated. During the operation, an interferometric position measurement as well as a highly accurate control of the *cantilever* deflection (by means of z -actuator and bending signal of the optical lever) are carried out and the combination of the movements of NMM-1 stage and the LiAFM z -actuator is used.

The LiAFM was successfully assembled, integrated into the NMM-1 and used for numerous measurement tasks. In this thesis, this novel LiAFM, its special features, mode of operation, setup, metrological properties as well as the most important measurements and their results are described in detail.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	1
1 Einleitung und Überblick	9
2 Stand der Technik und Wissenschaft	13
2.1 MAFM der NPL (Großbritannien)	14
2.2 MAFM der METAS (Schweiz)	15
2.3 SFM Veritekt der PTB (Deutschland)	16
2.4 LR-SFM der PTB (Deutschland)	17
3 Konzept des LiAFM	19
4 Grundlagen zur Rasterkraftmikroskopie	21
4.1 Prinzipielles Verfahren des Rasterkraftmikroskops	22
4.1.1 Wechselwirkungskräfte zwischen Antastspitze und Oberfläche	22
4.1.2 Antastspitze und <i>Cantilever</i>	23
4.1.3 Betriebsarten	25
4.2 Rastereinheit	28
4.3 Methoden zur Erfassung der Sondenauslenkung	31
4.3.1 Lichtzeiger	32
4.3.2 Interferometrische Detektion am Beispiel eines Planspiegelinterferometers	36
5 Interferometrisches Sondenmesssystem	39
5.1 Das Prinzip der gleichzeitigen Erfassung von Position und Winkellage	39
5.2 Dimensionierung des interferometrischen Sondenmesssystems	40
5.3 Optische Anordnung	50
6 Aufbau des LiAFM	55
6.1 Aufbau und Justage des Sondenmesssystems	55
6.2 Sondenaufnahme	58
6.3 Mikroskopkamarasystem	62
7 LiAFM als Tastsystem der NMM-1	65
7.1 Mechanische Einbindung in die NMM-1	66
7.2 Elektrische Einbindung in die NMM-1	67
7.2.1 <i>Contact</i> -Modus (CM)	69
7.2.2 <i>Intermittent</i> -Modus (IM)	70
7.2.3 Aktives Antastsystem	71
7.3 Kalibrierung des LiAFM	73
7.3.1 <i>Contact</i> -Modus (CM)	75
7.3.2 <i>Intermittent</i> -Modus (IM)	79

8	Messtechnische Eigenschaften des LiAFM	81
8.1	Analyse des Sondenmesssystems	81
8.2	Charakterisierung des Gesamtsystems	88
8.2.1	Umweltabhängigkeit	88
8.2.2	Signalrauschen	89
8.2.3	Stabilität der Kalibrierkennlinien	90
8.2.4	Langzeitstabilität	92
8.2.5	Messbedingungen	95
8.2.6	Form des Tastelementes	97
8.2.7	Kombinierte Messunsicherheit	100
9	Applikationsmessungen	107
9.1	Stufenhöhennormale	107
9.2	Gitterstrukturen	109
9.3	Langstreckenmessungen	113
9.4	Kugeloberflächen	118
9.5	Hochgeschwindigkeitsmessungen	120
10	Zusammenfassung und Ausblick	123
	Literaturverzeichnis	127
A	Anhang: Übersicht kommerzieller Rastersondenmikroskope	147
B	Anhang: Übersicht metrologischer Rastersondenmikroskope	155
C	Anhang: FEM-Analysen des <i>Cantilevers</i>	161
D	Anhang: Gaußsche Strahltheorie	163
E	Anhang: Konfiguration des APC	165
F	Anhang: Initialisierung des LIAFM	167
G	Anhang: Brechzahlberechnung	169
H	Anhang: Herleitung der Berechnungsgleichung der Messlänge	171
I	Anhang: Bestimmung von Sensitivitätskoeffizienten	173

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

A/D	Analog/Digital
AFAM	akustisches Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Atomic Force Acoustic Microscope</i>
AFM	Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Atomic Force Microscope</i>
APC	engl. <i>Active Probe Controller</i>
BNC	koaxialer Steckverbinder, von engl. <i>Bayonet Neill Concelman</i>
BTE	engl. <i>blind tip estimation</i> , Methode der Schätzung der Spitzegeometrie ausgehend von einer Messobjektoberfläche mit hohen zufälligen Nanostrukturen mit kleinen Kantenradien
BWD	rückwärts, (Scan)bewegung in negative Achsenrichtung
C-AFM	Leitfähigkeits-Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Conducting Atomic Force Microscope</i>
CCD	engl. <i>Charge-coupled Device</i>
CD	engl. <i>Compact Disc</i>
CFM	chemisches Kraftmikroskop, von engl. <i>Chemical Force Microscope</i>
CM	<i>Contact</i> -Modus
CMOS	sich ergänzender Metalloxid-Halbleiter, von engl. <i>complementary metal-oxide-semiconductor</i>
C-Mount	genormter Gewindeanschluss für Kameraobjektive
COG	Schwerpunkt, von engl. <i>centre of gravity</i>
D/A	Digital/Analog
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	engl. <i>diamond-like carbon</i> , diamantähnlicher amorpher Kohlenstoff
DMS	Dehnungsmessstreifen, engl. <i>Strain Gauge</i>
DSP	Digitaler Signalprozessor
DVD	engl. <i>Digital Versatile Disc</i>
EFM	elektrostatisches Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Electrostatic Force Microscope</i>
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FEM	Finite Elemente Methode
FFM	Reibungskraftmikroskop, von engl. <i>Friction Force Microscope</i>

FT	Fourier-Transformation, von engl. <i>Fourier transform</i>
FWD	vorwärts, (Scan)bewegung in positive Achsenrichtung
GUM	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, von engl. <i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
He-Ne	Helium-Neon
I	<i>integral</i> , Anteil der Übertragungsfunktion eines Reglers
IM	<i>Intermittent</i> -Modus
IPMS	Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITRS	engl. <i>International Technology Roadmap for Semiconductors</i>
KFM	Kelvinkraftmikroskop, von engl. <i>Kelvin Force Microscope</i>
KPFM	Kelvinsondenkraftmikroskop, von engl. <i>Kelvin Probe Force Microscope</i>
LFM	Lateralkraftmikroskop, von engl. <i>Lateral Force Microscope</i>
LIAFM	Laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Atomic Force Microscope</i>
LR-SFM	Rasterkraftmikroskop mit erweitertem Messbereich, von engl. <i>Large Range Scanning Force Microscope</i>
LVDT	Induktiver Sensor oder Differentialtransformator, von engl. <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
LWL	Lichtwellenleiter
MAFM	metrologisches Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Atomic Force Microscope</i>
PTC [®] Mathcad	kommerzielle Rechensoftware des Unternehmens PTC Inc.
MATLAB [®]	kommerzielle Software des Unternehmens The MathWorks, Inc. zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse. Matlab ist primär für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen ausgelegt, woher sich auch der Name ableitet: <i>MATrix LABoratory</i>
METAS	Bundesamt für Metrologie in der Schweiz, Pendant zur deutschen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)
MFM	Magnetkraftmikroskop, von engl. <i>Magnetic Force Microscope</i>
NCM	<i>Non-Contact</i> -Modus
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
NMI	Nationale Metrologie-Institut
NMM-1	der erste Prototyp der NPMM
NPL	engl. <i>National Physical Laboratory in Großbritannien</i> , Pendant zur deutschen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)
NPMM	Nanopositionier- und Nanomessmaschine
NPMM-200	NPMM mit einem stark vergrößerten Messbereich
NSOM	optisches Rasternahfeldmikroskop, von engl. <i>Near-Field Scanning Optical Microscope</i>

NT	Neutraler Strahlteiler
PC	Rechner, von engl. <i>Personal Computer</i>
PF	Polarisationsfilter
PI	Proportional-Integral, von engl. <i>proportional-integral</i>
PID	Proportional-Integral-Differenzial, von engl. <i>proportional-integral-derivative</i>
PSD	Positionsempfindlicher Detektor, von engl. <i>Position Sensitive Detector</i> , Quadrantenfotodiode, Quadrantendiode, auch 4-Quadrantenfotodiode der/die die 1D- oder 2D Position eines einfallenden Lichtstrahls messen kann
PT	Polarisierender Strahlteiler
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
REM	Rasterelektronenmikroskopie, von engl. <i>Scanning Electron Microscopy</i> , SEM
RMS	quadratische Mittel oder der quadratische Mittelwert, von engl. <i>root mean square</i>
RS-232	Serielle Schnittstelle
SCM	Rasterkapazitätsmikroskop, von engl. <i>Scanning Capacitance Microscope</i>
SECM	elektrochemisches Rastermikroskop, von engl. <i>Scanning Electrochemical Microscope</i>
SFAM	Ultraschallkraftmikroskop, von engl. <i>Scanning Force Acoustic Microscope</i>
SFB	Sonderforschungsbereich
SFM	Rasterkraftmikroskop, von engl. <i>Scanning Force Microscope</i>
SI	Internationale Einheitensystem, von frz. <i>Système international d'unités</i>
SNOM	optisches Rasternahfeldmikroskop, von engl. <i>Scanning Near-Field Optical Microscope</i>
SPM	Rastersondenmikroskopie, von engl. <i>Scanning Probe Microscopy</i>
SSRM	Rasterausbreitungswiderstandsmikroskop, von engl. <i>Scanning Spreading Resistance Microscope</i>
SThM	Rasterthermomikroskop, von engl. <i>Scanning Thermal Microscope</i>
STM	Rastertunnelmikroskop, von engl. <i>Scanning Tunneling Microscope</i>
THD	Schwellenwert, von engl. <i>threshold</i>
TU	Technische Universität, engl. <i>Technical University</i>
UHV	Ultrahochvakuum, von engl. <i>Ultra High Vacuum</i>
USB	serielles Bussystem, von engl. <i>Universal Serial Bus</i>
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZBS	Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V., Ilmenau

Formelzeichen

A	Fläche
a	A/D-Wandlerwert
b	Breite
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts, Sensitivitätskoeffizient
c_0	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in Vakuum
d	Abstand, Durchmesser, Nenner, engl. <i>denominator</i>
d_f	Abstand zwischen der Fokussierlinse und der Sonde
d_x	Auslenkung in x -Richtung
d_y	Auslenkung in y -Richtung
d_z	Auslenkung in z -Richtung
E	Elastizitätsmodul
e	Fehler
F_A	Achsialkraft
F_L	Lateralkraft
F_{LJ}	Wechselwirkungskraft nach Lennard-Jones
F_N	Normalkraft
F_l	Sicherheitsgrenze ForceLower
F_m	Messkraft
F_u	Sicherheitsgrenze ForceUpper
f	Brennweite der Fokussierlinse, Frequenz
f_0	Resonanzfrequenz des <i>Cantilevers</i>
f_{kol}	Brennweite der Kollimatorlinse
f_t	Brennweite der Tubuslinse
G	Übertragungsfunktion
H	Höhe
h	Höhe
I	Intensität
I_0	Maximale Intensität
$I_{0r,m}$	Maximale Intensität des Mess- und Referenzstrahls vor der Auswerteblen- de
I_A	Fotostrom
I_B	Fotostrom
I_C	Fotostrom
I_D	Fotostrom
I_{int}	Interferenzintensität
I_x	axialer Flächenträgheitsmoment

i	Laufindex
j	Laufindex
K_d	Differenzierbeiwert eines Reglers
K_i	Integrierbeiwert eines Reglers
K_p	Proportionalbeiwert eines Reglers
k	Federkonstante des <i>Cantilevers</i> , Polynomkoeffizient, Faktor
k_{SM-04}	Messbereichfaktor der Schwingungsmesskarte SM-04
k_{TF}	Teilungs- bzw. Interpolationsfaktor
L	Länge des <i>Cantilevers</i>
L_{max}	Maximaler Messbereich
l	Länge der Spitze des <i>Cantilevers</i> und des Tasterschaftes, Länge
l_a	Interferometerwert
l_g	Glasstrecke
l_m	Messstrecke bzw. Messergebnis der interferometrischen Messung
$l_{m,g}$	Totstreckenkorrektur Glasstrecke
$l_{m,k}$	korrigiertes Messergebnis der interferometrischen Messung
$l_{m,l}$	Totstreckenkorrektur Luftstrecke
l_t	Totstrecke
l_z	Interferometerwert der z -Achse
M_{bx}	Biegemoment
m	Anzahl
N	Demodulationswert bzw. Zählerstand, Übertragungsfunktion eines Notch-filters
n	Brechzahl, Anzahl, Zähler, engl. <i>numerator</i>
n_{norm}	Brechzahl bei Normalbedingungen
P	Pitch, Periodenlänge
p	Parallelversatz, Luftdruck
pv	Schwankung, Spitze-Tal-Wert, engl. <i>peak-to-valley value</i>
p_X	Parallelversatz in x -Richtung
p_Y	Parallelversatz in y -Richtung
p_{sv}	Sättigungsdampfdruck
p_v	Wasserdampfpartialdruck
p_x	Position in x -Richtung
p_y	Position in y -Richtung
p_z	Position in z -Richtung
RH	relative Luftfeuchte, engl. <i>relative humidity</i>
R_a	arithmetische Mittenrauwert
R_q	quadratische Mittenrauwert oder RMS-Rauheit
R_z	gemittelte Rautiefe, arithmetische Mittel der Differenz der Höhe der größten Profilsitzen und der Tiefe des größten Profiltals innerhalb der fünf Einzelmessstrecken

r	Radius, Spitzenradius des <i>Cantilevers</i> , Residuum
S	Ausgangssignal (z. B. positionsempfindlicher Detektor (PSD))
$S_{\text{SM-04}}$	wegproportionales Ausgangssignal SM-04
S_A	Amplitudensignal
S_{cos}	Ausgangssignal EM-05 cos
S_{ϕ}	Phasensignal
S_S	Stellsignal
S_{sin}	Ausgangssignal EM-05 sin
S_x	Ausgangssignal PSD-03 Torsion
S_y	Ausgangssignal PSD-03 Biegung
s	Abstand, Trennstegbreite des PSD, komplexe Variable der Laplace-Transformation, Standardabweichung
T	Dicke des <i>Cantilevers</i> , absolute Temperatur
t	Zeit
U	elektrische Spannung, Unsicherheit
U_0	Versorgungsspannung
u	Unsicherheit
v	Durchbiegung, Geschwindigkeit
W	Breite des <i>Cantilevers</i>
w	Radius des Laserstrahls
w_0	Strahltaille
w'_0	transformierte bzw. abgebildete Strahltaille
w_{of}	Taille des fokussierten Laserstrahls
w'_{of}	Taille des fokussierten Laserstrahls nach erneuter Transformation durch die Fokussierlinse
$w_{0\text{kol}}$	Strahltaille bei verlassen des Lichtwellenleiter (LWL)
$w'_{0\text{kol}}$	(transformierte) Taille des kollimierten Laserstrahls
w_{m}	Radius des Messstrahls
w_{r}	Radius des Referenzstrahls
x	Achsenbezeichnung, Schätzwert
x_{CO_2}	CO ₂ -Gehalt bzw. Konzentration
y	Achsenbezeichnung
z	Achsenbezeichnung, Durchbiegung, Auslenkung, komplexe Variable der z -Transformation
z_0	Entfernung der Strahltaille w_0 von der Brennebene der Linse
$z_{0\text{lf}}$	Entfernung der Strahltaille $w'_{0\text{kol}}$ von der Brennpunkt der Linse
$z'_{0\text{lf}}$	bildseitige Entfernung der transformierten Strahltaille w_{of} von der Brennebene der Fokussierlinse
$z_{02\text{f}}$	Entfernung der Strahltaille w_{of} von der Brennpunkt der Linse
$z'_{02\text{f}}$	bildseitige Entfernung der transformierten Strahltaille w'_{of} von der Brennebene der Fokussierlinse

z'_0	bildseitige Entfernung der transformierten Strahltaile w'_0 von der Brennebene der Linse
$z_{0\text{kol}}$	Entfernung des LWL zum Brennpunkt der Kollimatorlinse
$z'_{0\text{kol}}$	bildseitige Entfernung der transformierten Strahltaile $w'_{0\text{kol}}$ von der Brennebene der Kollimatorlinse
z_R	Rayleigh-Länge
z_{Rf}	Rayleigh-Länge des fokussierten Laserstrahls
α	Winkel (Neigungs-, Durchbiegungswinkel), Variable, thermischer Ausdehnungskoeffizient
α_x	Kippwinkel in x -Richtung
α_y	Kippwinkel in y -Richtung
$\alpha_{y,\text{AKF}}$	Kippwinkel in y -Richtung, gemessen mit dem Autokollimator
β	Variable
ΔI	Intensitätsänderung
ΔL	Längenänderung (des <i>Cantilevers</i>)
ΔL_m	Änderung der optischen Messarmlänge
ΔS_y	Änderung des Biegungssignals, Auslenkungsänderung
$\Delta \lambda_0$	Änderung der Wellenlänge
$\Delta \varphi$	Änderung der Phasendifferenz
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz, Temperatursprung
Δz	Auslenkungsänderung, Verschiebungsänderung
δ	Variable
Γ	Vergrößerung
λ	Wellenlänge
λ_0	Vakuumwellenlänge
λ_{norm}	Wellenlänge bei Normalbedingungen
ω	Kreisfrequenz
σ	Wellenzahl
θ	Öffnungswinkel
φ	(demodulierte) Phasendifferenz
ϑ	Temperatur in °C
ζ	Dämpfungsfaktor

1 Einleitung und Überblick

“Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe,
nur scheinbar ist es süß oder bitter;
in Wirklichkeit gibt es nur Atome
und den leeren Raum.”
– Demokrit

400 v. Chr.: Der altgriechische Philosoph Demokrit postuliert: “Die Materie ist aus Atomen – kleinen, unteilbaren Teilchen – aufgebaut.”

Vor 60 Jahren: Physiker Richard P. Feynman erläuterte in seiner visionären Rede [62] über die Zukunft von Miniaturisierungstechniken die Idee der Manipulationen von Materie auf atomarer Ebene. Die Idee der Nanotechnologie.

Erst in den frühen 80er Jahren wurde es möglich, Untersuchungen mit nie zuvor erreichter Auflösung durchführen: die Atome zu “sehen”, zu “fühlen” und zu “bewegen”. Gerd Binnig und Heinrich Rohrer entwickelten das erste Werkzeug der Nanotechnologie: das Rastertunnelmikroskop (STM) [19]. Dieser Erfindung folgte schnell die Entwicklung einer ganzen Reihe verwandter Verfahren, zusammengefasst unter dem Begriff Rastersondenmikroskopie (SPM). Einer der Vertreter diesen neuartigen Techniken ist das 1986 vorgestellte Rasterkraftmikroskop (AFM) [17]. Die industrielle Eroberung der Nanometer-Dimension hatte damit begonnen. Die Nanotechnologie – interdisziplinäre Forschung, Entwicklung und Manipulation auf der atomaren Ebene, im Nanometerbereich – gilt als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts [131]. Schon seit einigen Jahren dient die SPM für die bildliche Darstellung atomarer Strukturen. Beim heutigen Fortschritt der Technik (Elektronik, Bio-, Mikro-, Nanotechnologie, Präzisionstechnik und vieler anderer) besteht Bedarf in der metrologisch exakten Objektvermessung mit Nanometergenauigkeit [57]. Solche Messungen sind aber nur möglich, wenn Mess- und Positioniersysteme entsprechend gute metrologische Eigenschaften besitzen und auf nationale und internationale Normale rückführbar sind [106]. Nur bei wenigen Geräten wird auf hervorragende metrologische Eigenschaften geachtet. Während international große Anstrengungen unternommen wurden, die Metrologie der AFM-Positionierung zu verbessern, sind systematische Untersuchungen zur Optimierung von *Cantilever*-Lagedetektoren weniger bekannt [238].

Bei der Waferinspektion besteht Bedarf nach entsprechend großen Messbereichen. Der *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS) zufolge, war die Halbleiterherstellung auf 450 mm Wafer mit 36 nm Strukturen ($\frac{1}{2}$ Pitch) ab 2012 zu erwarten [103, 104]. Allerdings verschiebt sich die Einführung von 450 mm Wafer voraussichtlich um fast 10 Jahre [102]. Die kommerzielle Rastersondenmikroskopie (SPM) ist typischerweise auf Scanbereiche von $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ beschränkt [153]. Größere Messobjekte lassen sich daher schwierig untersuchen. Ebenfalls ist es problematisch eine bestimmte Stelle auf einer Messoberfläche wiederzufinden, nachdem diese aus dem Scanbereich des SPM entfernt wurde.

Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der SIOS Messtechnik GmbH und anderen Fachgebieten der TU Ilmenau wurde im Jahr 2002 eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPMM) NMM-1 im Rahmen eines Thüringer Verbundprojektes entwickelt [80]. Diese Maschine dient der hochgenauen Positionierung und Vermessung von Objekten in einem Bereich von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. Der Aufbau der NMM-1 erlaubt den Einsatz verschiedener Systeme zur Antastung der Messobjektoberfläche. Dem Sonderforschungsbereich (SFB) 622 ist es gelungen, die Messauflösung der NMM-1 von $1,24\text{ nm}$ auf $0,1\text{ nm}$ und die Positionierungsunsicherheit von 90 nm auf weniger als 10 nm zu verbessern [189]. Um die steigenden Anforderungen der Entwicklungen der Mikro- und Nanomesstechnik zu erfüllen, wurde im Rahmen eines Transfer- und Verbundprojektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) die NPMM-200 mit einem Messbereich von $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ entwickelt.

Die quantitativen dimensionellen Messungen der NPMM werden durch die metrologischen Eigenschaften wie Stabilität, Empfindlichkeit, Reproduzierbarkeit und Rauschverhalten des verwendeten Antastsystems stark beeinflusst. Als am IPMS vor einigen Jahren die NMM-1 entwickelt wurde, existierte noch kein kommerzielles AFM, welches in die Maschine hätte integriert werden können und dabei die metrologischen Anforderungen hätte erfüllen können. Dies war der Ausgangspunkt für die Überlegungen zur Entwicklung eines neuartigen laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM) im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), welches als Antastsystem in der NMM-1 dienen soll. Die Messung des LiAFM soll auf nationale und internationale Normale rückführbar sein. Dies kann nur durch den Einsatz eines Interferometers erreicht werden [107]. Seit vielen Jahren wird im IPMS der TU Ilmenau auf dem Gebiet der lichtwellenleitergekoppelten Interferometrie geforscht. Es wurde ein Planspiegelinterferometer, basierend auf dem Homodynprinzip und klassischer Anordnung von A. Michelson zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Probenoberflächen, entwickelt [10]. Das Interferometer zeichnet sich durch hohe Linearität und eine Auflösung von $0,1\text{ nm}$ sowie einen kompakten Aufbau ohne thermischen Beeinflussung der Messumgebung durch den Laser aus. Diese Eigenschaften sind die Voraussetzung für die Anwendung des Planspiegelinterferometers zur Auslenkungsmessung der Sonde (*Cantilever* mit der Antastspitze). Dieses interferometrische Verfahren erlaubt jedoch keine getrennte Erfassung von Torsion und Biegung des *Cantilevers*. Außerdem ist es nicht möglich zwischen der Positionsveränderung und Biegung des *Cantilevers* zu unterscheiden. Deshalb ist ein zusätzliches Messsystem erforderlich, das Biegung und Torsion erfassen kann. Dies ist die Überlegung, die Auslenkungen des *Cantilevers* nach der bekannten Methode des Lichtzeigers [153] zu messen. Es entstand am IPMS die Idee, beide Messsysteme – Interferometer und Lichtzeiger – zu kombinieren [53, 192] und als Sondenmesssystem im neuartigen LiAFM zu benutzen. Darüber hinaus ist im LiAFM ein hochdynamischer piezoelektrischer Antrieb integriert. Damit ist eine rückführbare interferometrische Positionsmessung sowie eine hochgenaue Positionsregelung der Auslenkung des *Cantilevers* (mittels piezoelektri-

schen Antriebes und Biegungssignals oder Amplitudensignals des Lichtzeigers) während der Messung möglich.

Die vorliegende Arbeit stellt die besonderen Merkmale, die Funktionsweise, den Aufbau, die messtechnischen Eigenschaften sowie wichtige Applikationsmessungen und deren Ergebnisse dieses neuartigen laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM) dar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden wesentliche Beiträge zum Entwurf, optischen und mechanischen Design, Konstruktion und Aufbau des Sondenmesssystems, der Sondaufnahme und des Kamerasystems des LiAFM geleistet. Weiterhin wurde das LiAFM aufgebaut, in Betrieb genommen und in der NMM-1 kalibriert. Darüber hinaus wurden die messtechnischen Eigenschaften des LiAFM untersucht und die kombinierte Messunsicherheit einer Beispielmessung betrachtet. Um die Leistungsfähigkeit des LiAFM zu analysieren wurden Messungen an unterschiedlichsten Messobjekten inklusive kalibrierten Normalen durchgeführt. Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bereits veröffentlicht und sind entsprechend referenziert.

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik und Wissenschaft kommerzieller und metrologischer Rastersondenmikroskope betrachtet sowie eine Auswahl von metrologischen AFM analysiert und die Vor- und Nachteile jedes Gerätes im einzelnen erläutert.

In Kapitel 3 wird kurz ein Überblick über das Konzept des LiAFM und seine wichtigsten Baugruppen gegeben.

Kapitel 4 enthält eine Übersicht über die Grundlagen zur Rasterkraftmikroskopie mit Erläuterungen zu Rastereinheit, Deflektionsmessverfahren und Lagedetektoren zur Erfassung der Sondenauslenkungen.

Kapitel 5 befasst sich mit der Darstellung des interferometrischen Sondenmesssystems und seiner unterschiedlichen optischen Anordnungen.

Kapitel 6 erläutert den Aufbau des LiAFM. Von besonderer Bedeutung sind hierbei das Sondenmesssystem, die Sondaufnahme und das Mikroskopkamerasystem.

Kapitel 7 stellt die Einbindung des LiAFM in die NMM-1 und die Kalibrierung des Antastsystems für Messungen in statischen und dynamischen Betriebsarten dar.

Kapitel 8 befasst sich mit den messtechnischen Eigenschaften des LiAFM. Es werden das interferometrische Sondenmesssystem des LiAFM analysiert und die Umwelteinflüsse insbesondere auf die interferometrischen Messungen betrachtet. Nachfolgend wird das Gesamtsystem bestehend aus dem Antastsystem (LiAFM) und der NMM-1 charakterisiert und die Modellgleichungen für unterschiedliche Betriebsarten hergeleitet. Dabei dient als Grundlage für die Charakterisierung des Gesamtsystems die Richtlinie VDI/VDE 2656 Blatt 1 [180]. Die Modellgleichungen werden für die Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit benötigt.

Kapitel 9 beinhaltet eine Übersicht der wichtigsten Applikationsmessungen wie Stufenhöhenprofile und Gitterstrukturen und enthält Ergebnisse zu Messungen über große Bereiche wie Kugeloberflächen, strukturierte Wafer und Oberflächen mit Kreuzstrukturen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und Ausblick.

2 Stand der Technik und Wissenschaft – kommerzielle und metrologische AFM

Vor 30 Jahren, knapp nach der Entwicklung des AFM [17] (Abbildung 2.1), waren erste kommerzielle Geräte von den Firmen Digital Instruments Inc. (Abbildung 2.2), Park Scientific Instruments Inc. und TopoMetrix Inc. auf dem Markt verfügbar. Im Laufe der Zeit haben sich AFM zu Werkzeugen der Grundlagenforschung und Analysegeräten in der Industrie entwickelt. In der Halbleiterindustrie sind das automatisierte Systeme für die Masken- und Waferinspektion (z. B. XE-WAFER bei Park Systems Corp., Dimension X3D bei Veeco Instruments Inc.¹). Kommerzielle AFM stehen der Forschung in vielfältigen Ausführungen zur Verfügung. Eine Zusammenstellung der Hersteller und Geräteserien ist im Anhang A (S. 147) aufgeführt. Alle hier vorgestellten Systeme haben eines gemeinsam: eine gute Benutzerfreundlichkeit. Sie sind gut geeignet für Routinemessungen, unterstützen eine große Vielfalt an Betriebsarten und Rastersondenmethoden, ermöglichen die Untersuchungen sowohl an Luft als auch in Flüssigkeiten, Vakuum und Schutzgasen, bei hohen und tiefen Temperaturen. Ziel heutiger Entwicklungen in der kommerziellen SPM sind nicht nur Instrumente für die schnelle Abbildung der Oberfläche mit sehr starker Vergrößerung, sondern für hochpräzise Messungen. Es ist notwendig, die kommerziellen AFM mit Hilfe von geeigneten und rückgeführten zertifizierten Normalen zu prüfen und zu kalibrieren [180]. Diese Maßverkörperungen sind wiederum mittels direkt rückführbarer Diffraktometrie und Interferenzmikroskopie oder hochgenauer AFM mit Rückführbarkeit auf SI-Längeneinheit durch eingebaute Laserinterferometer kalibriert [56]. Solche Geräte werden als metrologische Rasterkraftmikroskope (MAFM) bezeichnet und in nationalen Metrologie-Instituten (NMI) zur Kalibrierung von unterschiedlichen geometrischen Normalen und Messung von dimensionellen Parametern verschiedener Nano- und Mikrostrukturen verwendet. Die metrologischen Rasterkraftmikroskope (MAFM) haben neben der Rückführbarkeit noch weitere besondere Merkmale [45]:

- Langzeitstabilität des gesamten Messgerätes durch steife und auf geringste thermische Ausdehnung optimierte mechanische Anordnung;
- geringe Positionierungsunsicherheit des Scanners durch Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips² und Verringerung von Winkelfehlern während der Bewegung;
- sorgfältige Messdatenerfassung und -verarbeitung;
- Berücksichtigung der Geometrie des Tastelementes (Antastspitze) sowie Wechselwirkungen zwischen Antastspitze und Oberfläche bei der Messdatenauswertung [133].

¹Der AFM-Bereich gehört seit Ende 2010 zu Bruker AXS GmbH.

²Prüfling und Normal müssen fluchtend hintereinander angeordnet sein um Messabweichungen erster Ordnung zu vermeiden. Wichtigster Ansatz zur Reduzierung der Längenmessabweichung.

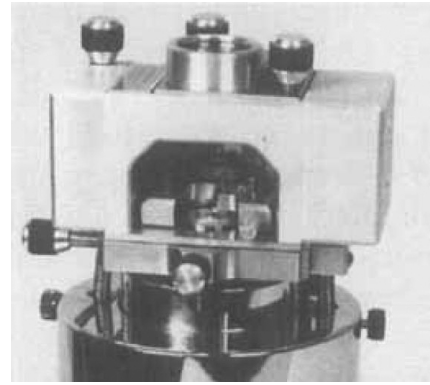
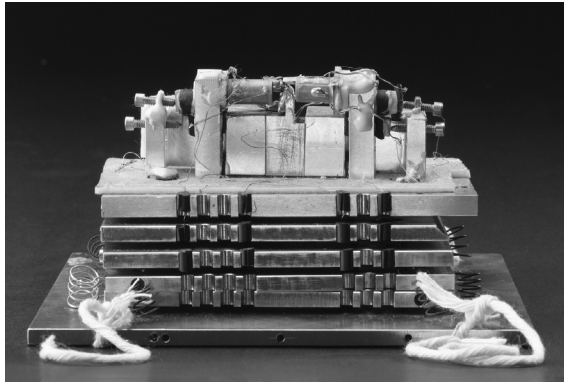


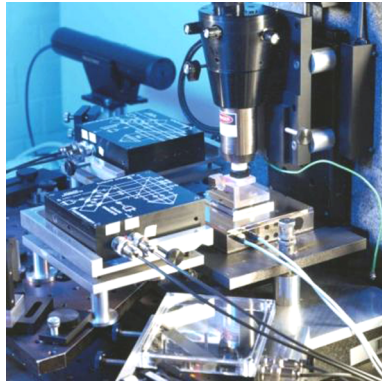
Abbildung 2.1: AFM von G. Binnig, C.F. Quate und Ch. Gerber³ Abbildung 2.2: NanoScope [136]

Weltweit gibt es bisher nur sehr wenige eigenentwickelte MAFM. Meistens werden modifizierte kommerzielle AFM mit zusätzlichen Positioniersystemen und Sensoren zur Positionsbestimmung eingesetzt. Anhang B (S. 155) enthält eine Zusammenstellung ausgesuchter Geräte. Die Auswahl ist auf MAFM mit interferometrischer Positionsmessung beschränkt. Den hier vorgestellten Systemen ist allen einiges gemeinsam: “*Scanning Sample*” (vgl. Tabelle 4.4, S. 29) oder aufgeteilte Anordnung zwischen x - y - (“*Scanning Sample*”) und z -Achse (“*Scanning Probe*”). In Systemen mit “*Scanning Sample*” Anordnung ist es möglich, das Abbe-Komparatorprinzip in allen Achsen zu realisieren. Die Sonde dient lediglich als “Nullindikator”. Als Beispiele werden im Folgendem vier prägnante am weitesten entwickelte MAFM dargestellt, welche das Spektrum dieser Kategorie von Rastersondenmikroskopen gut widerspiegeln.

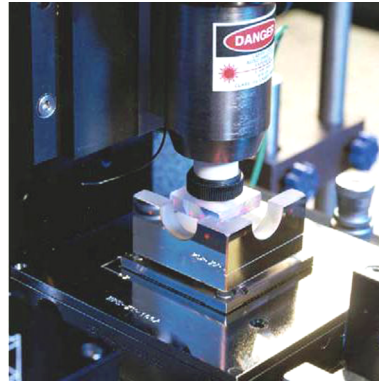
2.1 MAFM der NPL (Großbritannien)

Das *National Physical Laboratory* (NPL) verwendet ein kommerzielles AFM von Quesant Instruments Inc. (Ambios Technology Inc.) mit Lichtzeiger als Lagedetektor der *Cantilever*-Auslenkungen und integriertem x - y - z -Röhrchen-Scanner (“*Scanning Probe*” Anordnung), der nur zur Durchführung der vertikalen Bewegung der Sonde eingesetzt wird [82]. Der Scanvorgang wird in x - y -Ebene von der Flexure-Führung mit einem Bewegungsbereich von $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ ausgeführt (“*Scanning Sample*” Anordnung). Die horizontale Bewegung des Messobjektes sowie die vertikale Bewegung der Sonde wird mit drei differentiellen Zweistrahl-Planspiegelinterferometern gemessen (vgl. Abbildung 2.3(a)). Die Interferometer-Messdaten werden zur Rekonstruktion der gescannten Messobjektoberfläche verwendet. Auf der Flexure-Führung ist eine Spiegelecke und auf dem Sondenträger ist ein Spiegelwürfel befestigt (vgl. Abbildungen 2.3(b) und (c)). Während der Messung befindet sich das Messobjekt auf der Spiegelecke (vgl. Abbildung 2.3(b)) und wird zusammen mit dieser in x - y -Ebene bewegt. Spiegelecke und Spiegelwürfel weisen jeweils drei zueinander orthogonale Spiegelflächen auf. Die Spiegelecke und der Spiegelwürfel dienen als Mess- und

³Science Museum, London. <http://www.sciencemuseum.org.uk/broughttolife/objects/display.aspx?id=11071>. Stand: Juli 2016.



(a) Anordnung der Interferometer



(b) Spiegelecke und Flexure-Führung



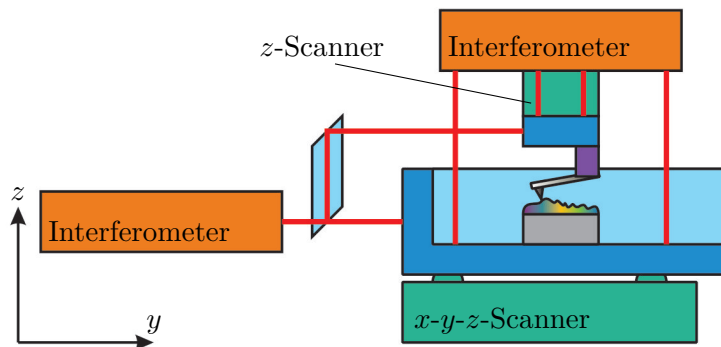
(c) Spiegelwürfel und Röhren-Scanner

Abbildung 2.3: *National Physical Laboratory (NPL) MAFM* [82]

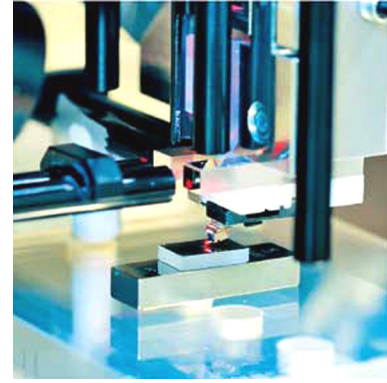
Referenzspiegel der drei Interferometer. Zwei Strahlen eines Interferometerarms reflektieren an der Spiegelecke, zwei andere Strahlen an dem Spiegelwürfel, wodurch die Relativbewegung zwischen Messobjekt und Sonde gemessen wird. Durch die Differenzlängenmessung werden die Einflüsse von thermischer Ausdehnung, Drift des mechanischen Aufbaus und Schwankungen der Umweltbedingungen verringert. In der Anordnung ist der Abbe-Versatz in allen Achsen unterschiedlich [82]. Der Hauptnachteil des hier beschriebenen Systems ist die Verlagerung des Lichtstrahls auf dem PSD während der Bewegung des Röhren-Scanners in z -Achse. Die Ursachen dafür liegen in der zusätzlichen Optik, die den Lichtstrahl nachführt als auch durchs Übersprechen (*“crosstalk”*) zwischen z - und x - y -Achsen des Röhren-Scanners [83]. Die Verlagerung des Lichtstrahls ist proportional zur Bewegung des Scanners und kann rückführbar kalibriert werden. Die Messdaten müssen korrigiert werden.

2.2 MAFM der METAS (Schweiz)

Am Bundesamt für Metrologie (METAS) wurde ein weiteres MAFM entwickelt (vgl. Abbildung 2.4). Das Gerät basiert auf drei differentiellen Jamin-Interferometern (eine frühere Entwicklung des NPL), einem kommerziellen 6-Achsen-Verschietisch mit einem Bewegungsbereich von $800\text{ }\mu\text{m} \times 800\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ und einem Sondenmesssystem mit einem Lichtzeiger als Lagedetektor. Die drei rotatorischen Achsen des Tisches dienen dem aktiven Ausgleich unerwünschter Verkippungen während der Scan-Bewegungen. Ein zusätzlicher schneller Piezoscanner mit $12\text{ }\mu\text{m}$ Hub bewegt das Sondenmesssystem in vertikaler Richtung zur Erhöhung der Messdynamik. Als Messobjekthalter dient ein Zerodur-Spiegelträger. Am Sondenmesssystem ist ein Referenzspiegel für die drei differentiellen Interferometer befestigt, der zusammen mit dem Sondenmesssystem bewegt wird, wodurch ein kompakter Messkreis entsteht (vgl. Abbildung 2.4(a)). Die Strahlen der differentiellen Zweistrahl-Planspiegelinterferometer sind symmetrisch bezüglich der drei Messachsen angeordnet. Obwohl die Anordnung nominell das Abbe-Prinzip erfüllt, verbleibt ein kleiner Offset



(a) Grundanordnung des MAFM



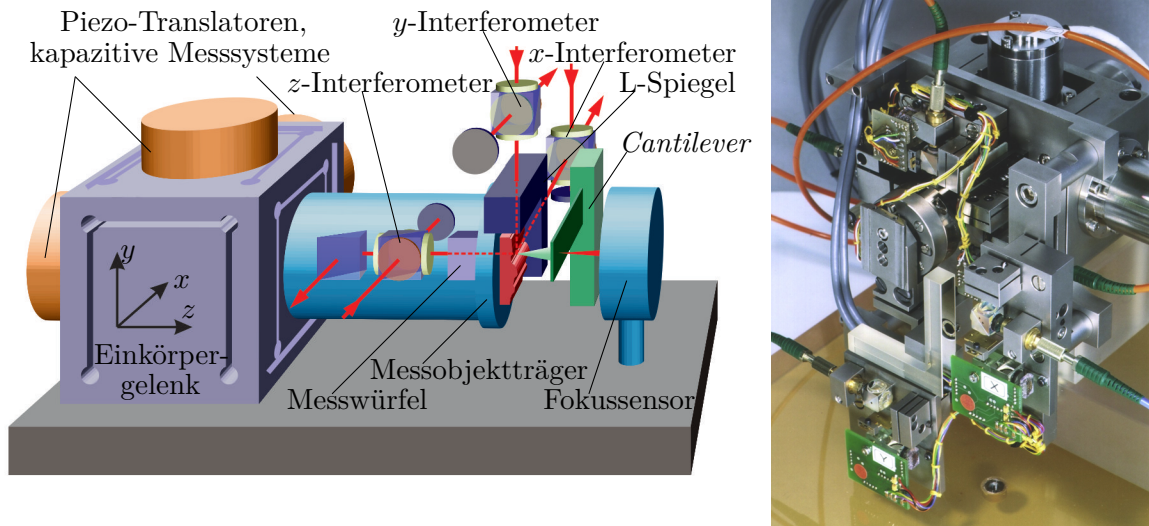
(b) Anordnung der Messstrahlen, Spiegelecke und Messkopf

Abbildung 2.4: METAS neues MAFM [147]

(< 1 mm). Das Sondenmesssystem ist auf einer groben Positioniervorrichtung befestigt, die die Sonde um 50 mm nach oben bewegen kann um die Sonde und/oder Messobjekt zu ersetzen. Mit dem neuen MAFM Aufbau sind Messungen an Objekten mit einer Größe von bis zu 90 mm × 60 mm × 60 mm möglich [147].

2.3 SFM Veritekt mit Abbe-fehlerfreien 3D-Nanomesssystem der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Deutschland)

Das erste MAFM der PTB mit der Abbe-fehlerfreien Anordnung der Interferometer ist auf Basis des kommerziellen SFM Veritekt-3 der Fa. Carl Zeiss Jena mit einem Bewegungsbereich von 70 µm × 15 µm × 15 µm im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem IPMS der TU Ilmenau und der PTB entstanden [11]. Als Lagedetektor und “Nullindikator” im SFM Veritekt dient ein Fokussensor (vgl. Abbildung 2.5(a)) und ermöglicht die Messungen im *Contact*-Modus (CM). Die dreidimensionale Scanbewegung des Messobjektes wird mit einem Einkörper-Führungssystem realisiert. Die Scanbewegung erzeugen in alle drei Bewegungsrichtungen eingesetzte positionsgeregelte Piezoaktoren. Als Messsysteme dienen dabei kapazitive Sensoren. Das SFM Veritekt verfügt über sehr gute messtechnische Eigenschaften [11]. Um mit dem SFM rückführbare Messungen durchführen zu können, wurde ein speziell entwickeltes laserinterferometrisches 3D-Nanomesssystem ins SFM integriert (vgl. Abbildung 2.5). Zuerst war das Ziel, das kapazitive Messsystem des Veritekt SFM mit den Interferometern des 3D-Nanomesssystems zu kalibrieren. Nach einigen Gerätemodernisierungen wurde es möglich, die Interferometersignale direkt als Wegsignale bzw. Positionssignale im SFM zu verwenden. Die drei Planspiegelinterferometer des 3D-Nanomesssystems wurden in Richtung der *x*-, *y*-, *z*-Achsen des SFM eingebaut (vgl. Abbildung 2.5). Ein Messwürfel mit drei zueinander orthogonalen Außenspiegeln wurde unterhalb des Messobjektträgers eingeordnet und diente als Messspiegel für alle drei



(a) Abbe-fehlerfreie Anordnung der Interferometer im SFM

(b) SFM mit Interferometern

Abbildung 2.5: PTB SFM Veritekt mit Abbe-fehlerfreien 3D-Nanomesssystem [11]

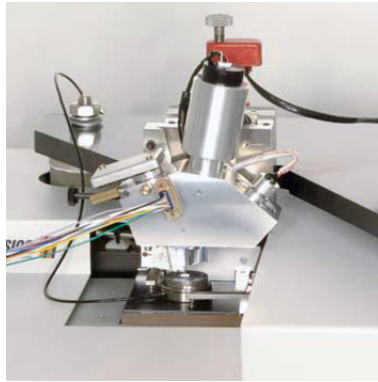
Interferometer (vgl. Abbildung 2.5(a)). In dieser Anordnung wurde das Abbe-Prinzip nur in z -Richtung realisiert. Erst durch das Einbringen eines L-Spiegels auf dem Messobjektträger wurde eine abbefehlerfreie Anordnung der x - und y -Interferometer möglich. Die virtuellen Verlängerungen der Messstrahlen der Interferometer schneiden sich im Antastpunkt der *Cantilever*-Spitze mit der Messobjektoberfläche (vgl. Abbildung 2.5(a)). Das gleiche Interferometeranordnungsprinzip wurde in der NMM-1 realisiert.

2.4 LR-SFM der PTB (Deutschland)

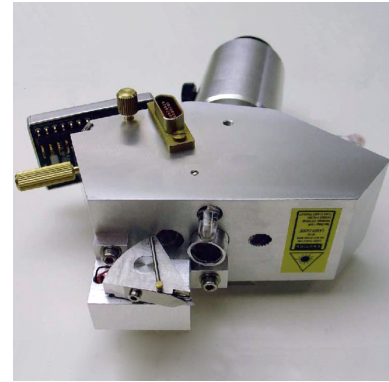
Die PTB hat ein LR-SFM (vgl. Abbildung 2.6) mit einem Messbereich von mehreren Millimetern auf Basis der NMM-1 von SIOS Messtechnik GmbH aufgebaut [43]. Das LR-SFM ermöglicht es Kalibrierungen an Lateralnormalen im Millimeterbereich durchzuführen [41] oder detailliert kleine Strukturen auf großen Bereichen zu messen [25]. Das Gesamtsystem besteht aus der NPMM (NMM-1) sowie einem kompakten piezoelektrischen Scanner für die z -Achse und einem Lichtzeiger als Lagedetektor. Der Lagedetektor dient als "Nullindikator". Der piezoelektrische Scanner wird als Messobjektträger verwendet und ist wiederum mechanisch mit der Spiegelecke (Positioniertisch) der NMM-1 verbunden (vgl. Abbildung 2.6). Während der Messung führt die NMM-1 die laterale Scanbewegung aus. In z -Achse werden gemeinsam die Bewegungen vom piezoelektrischen Scanner (hohe Frequenzen, kleiner Bewegungsbereich) und der NMM-1 (niedrige Frequenzen, großer Bewegungsbereich) genutzt. Durch die hohe Resonanzfrequenz des piezoelektrischen Scanners können hohe Scangeschwindigkeiten erreicht werden, was für Langstreckenmessungen sehr wichtig ist. Die Bewegung der Spiegelecke der NMM-1 wird mit drei Planspiegelinterferometern gemessen. Durch die besondere Interferometeranordnung wird das Abbe-Komparatorprinzip in allen Koordinatenachsen realisiert. Die Bewegung des piezoelektrischen Scanners wird mittels eines eingebauten kapazitiven Sensors gemessen. Um rückführbare Messungen durchzu-



(a) NPMM (NMM-1) mit dem eingebauten Messkopf



(b) Anordnung des piezoelektrischen Scanners und Messkopfes



(c) Messkopf mit einem Lichtzeiger als Lagedetektor

Abbildung 2.6: PTB LR-SFM [43]

führen, muss der kapazitive Sensor bzw. die Bewegung des piezoelektrischen Scanners kalibriert werden. Da der piezoelektrische Scanner als Messobjektträger dient, sind die Abmessungen und das Gewicht des Messobjektes stark begrenzt.

Auf Grundlage des Standes der Technik und der Forschungsergebnisse des IPMS wurde das Prinzip des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM) entwickelt, das die oben genannten Vorteile der unterschiedlichen MAFM nutzt und versucht, die Nachteile zu beseitigen.

3 Konzept des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM)

Ein laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop (LiAFM) wurde als Antastsystem für die NMM-1 konzipiert. Seine wichtigsten Baugruppen sind:

- **Sondenmesssystem** (Abschnitt 5) zur Aufzeichnung der Auslenkung (Position, Torsion und Biegung) der Sonde (*Cantilever*);
- **Sondenaufnahme** (Abschnitt 6.2) zur Halterung, Verstellung und Justage der Sonde;
- **Kamerasystem** (Abschnitt 6.3) zur Überwachung der Sondenjustage und des Messvorganges und zur Navigation auf der Messobjektoberfläche.

Das Konzept des LiAFM ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Der Lagedetektor ist die Hauptkomponente des LiAFM und wird auch als Sondenmesssystem bezeichnet. Das speziell entwickelte Sondenmesssystem beinhaltet einen Lichtzeiger und ein Interferometer zur gleichzeitigen Erfassung von Biegung und Torsion sowie rückführbarer Messung der Position des *Cantilevers* mit einem einzigen fokussierten Messstrahl (vgl. Abschnitt 5, S. 39). Das zur Durchbiegung des *Cantilevers* proportionale Lichtzeigersignal wird zur Antastregelung der NMM-1 genutzt. Ein Unterschied in den Konzepten des LiAFM und kommerziellen AFM-Geräten besteht in der Justierung des *Cantilevers* bezüglich des Messstrahls. In den kommerziellen AFM wird überwiegend der Laserstrahl auf dem freien Ende des *Cantilevers* ausgerichtet und der Lagedetektor (z. B. PSD) justiert. Im LiAFM ist der Messstrahl raumfest und die Ausrichtung des *Cantilevers* erfolgt mittels speziell entwickelten Justiereinheiten der Sondenaufnahme (vgl. Abschnitt 6.2, S. 58).

Im Unterschied zu kommerziellen AFM-Geräten wurde bei dem LiAFM auf *x-y*-Scanner verzichtet, da für die dreidimensionale Positionierung und Scanbewegung des Messobjektes die NMM-1 zuständig ist. Die Sondenaufnahme des LiAFM beinhaltet einen zusätzlichen hochdynamischen piezoelektrischen Antrieb, um die Messdynamik und den Messbereich des Antastsystems zu erhöhen [53]. Das LiAFM mit einem Positioniersystem wird als aktives Antastsystem bezeichnet (vgl. Abschnitt 7.2.3, S. 71). Während der Oberflächenmessung wird die Kombination der Bewegungen vom NMM-1-Tisch und piezoelektrischen Antrieb ausgenutzt. Der *Cantilever* wird vom Piezoantrieb in *z*-Richtung innerhalb des Arbeitsbereiches von wenigen Mikrometern mit hoher Geschwindigkeit bewegt, um die hochfrequenten kleineren Höhenänderungen auf der Messobjektoberfläche auszugleichen. Die NMM-1 gleicht dabei niederfrequente und größere Höhenunterschiede des Messobjektes aus. Der gesamte Messbereich der NMM-1 kann ausgenutzt werden.

Nach der Einführung in die Grundlagen zur Rasterkraftmikroskopie (Kapitel 4) werden die wichtigsten Baugruppen des LiAFM in folgenden Kapiteln 5 und 6 detailliert beschrieben.

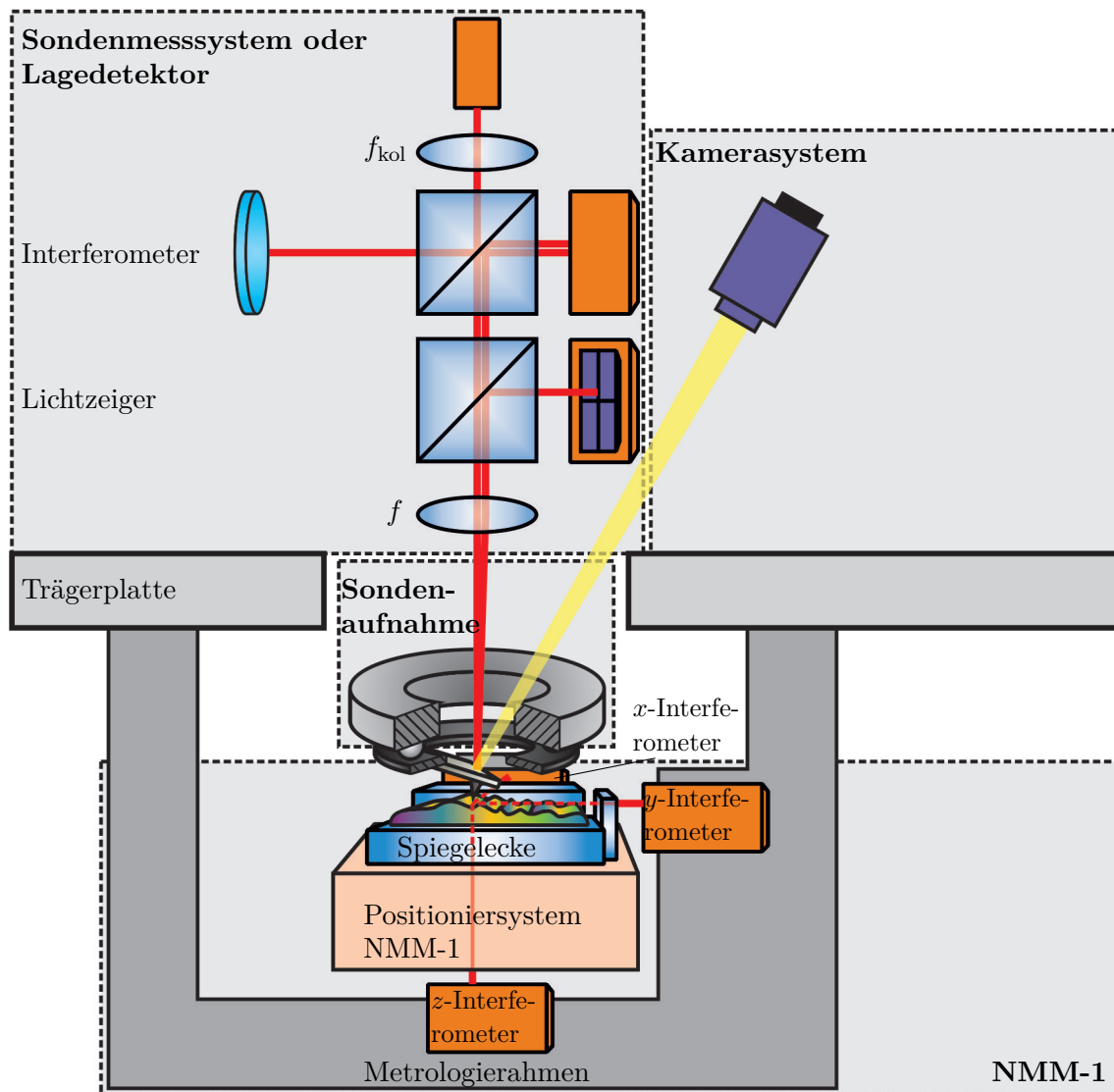


Abbildung 3.1: Konzept des LiAFM als Antastsystem für die NMM-1

4 Grundlagen zur Rasterkraftmikroskopie

Im Jahr 1982 wurde das Rastertunnelmikroskop (STM) von G. Binnig und H. Rohrer entwickelt [19]. Mit dieser Erfindung wurde die Grundlage für eine Palette von Werkzeugen zur Charakterisierung von Oberflächen mit atomarer Auflösung erschaffen. Oberbegriff für alle diese Analyseverfahren ist die Rastersondenmikroskopie (SPM). Alle Verfahren der SPM verwenden zur Abbildung der Oberfläche eines Messobjektes die Wechselwirkung zwischen der Oberfläche und einer sich im Nahfeld befindlichen extrem feinen Antastspitze [180]. Dies ermöglicht die Auflösungsgrenze der Fernfeldverfahren – wie bei optischen Mikroskopen oder der Rasterelektronenmikroskopie (REM) –, die auf die halbe Wellenlänge der Photonen bzw. Elektronen begrenzt ist, zu überwinden. Das Auflösungsvermögen der SPM wird hauptsächlich von der Geometrie der Antastspitze bestimmt [153], wobei Rastersondenmethode, Betriebsart, Lagedetektor, mechanisch und elektrisch bedingtes Rauschen, Topographie und Eigenschaften der Messobjektoberfläche sich ebenfalls auf die

<i>Topographische und mechanische Informationen</i>	
Rastertunnelmikroskop (STM)	Topographie
Rasterkraftmikroskop (AFM)	Topographie
Reibungskraftmikroskop (FFM), (LFM)	Reibung
akustisches Rasterkraftmikroskop (AFAM), (SFAM)	Elastizität
<i>Zusätzliche elektrische Informationen</i>	
elektrostatisches Rasterkraftmikroskop (EFM)	elektrostatische Eigenschaften
Kelvinsondenkraftmikroskop (KPFM), (KFM)	Potentialverteilung
Rasterkapazitätsmikroskop (SCM)	elektrische Ladungsverteilung, Kapazitätsverteilung
Rasterausbreitungswiderstandsmikroskop (SSRM)	lokale Widerstandscharakteristika
Leitfähigkeits-Rasterkraftmikroskop (C-AFM)	lokale Leitfähigkeit, Schichteigenschaften
<i>Zusätzliche magnetische Informationen</i>	
Magnetkraftmikroskop (MFM)	magnetische Domäne
<i>Zusätzliche thermische Informationen</i>	
Rasterthermomikroskop (SThM)	Temperaturverteilung und thermische Leitfähigkeit
<i>Zusätzliche chemische Informationen</i>	
chemisches Kraftmikroskop (CFM)	chemische Kontraste
<i>Zusätzliche optische Informationen</i>	
optisches Rasternahfeldmikroskop (SNOM), (NSOM)	Fluoreszenz

Tabelle 4.1: Auswahl von Rastersondenmethoden [15, 45, 64, 153, 231]

Auflösung auswirken. Die Messobjektoberfläche wird durch die Spitze in einem Rasterprozess Punkt für Punkt abgetastet, und die sich für jeden einzelnen Punkt ergebenden Messwerte werden zu einem “Bild” zusammengesetzt. In Abhängigkeit vom Abstand und den Eigenschaften von Antastspitze und Messobjektoberfläche kommt es dabei zu unterschiedlichen Wechselwirkungen zwischen Spitze und Oberfläche, die es ermöglichen, nicht nur die Topographie sondern auch lokale Eigenschaften der Oberfläche zu messen. Tabelle 4.1 ist eine Übersicht der wichtigsten Rastersondenmethoden, die je nach Information, die sie über das Messobjekt liefern, zusammengefasst sind.

Seit der Entwicklung im Jahr 1986 von G. Binnig, C.F. Quate und Ch. Gerber [17] gehört das Rasterkraftmikroskop (AFM) zu den wichtigsten sowie meist eingesetzten Vertretern der SPM für die Oberflächencharakterisierung. Das AFM benötigt kein elektrisch leitendes Messobjekt wie STM oder optisch transparente Oberflächen wie SNOM [15]. Außer dem STM und optischen Rastersondenmethoden basieren alle Methoden auf dem Grundprinzip des AFM.

4.1 Prinzipielles Verfahren des Rasterkraftmikroskops

4.1.1 Wechselwirkungskräfte zwischen Antastspitze und Oberfläche

Das Grundkonzept des AFM beruht auf der Messung der interatomaren Wechselwirkung zwischen der abzubildenden Oberfläche und einer Spitze. Die Wechselwirkung⁴ wird durch die lang- und kurzreichweitigen, sowie anziehende (*attractive*) und abstoßende (*repulsive*) Kräfte verursacht, die bei der Näherung der Antastspitze zur Oberfläche auftreten [153]. Die Kräfte liegen im nN-Bereich [31]. Langreichweitige Kräfte wirken zwischen dem kompletten Spitzenvolumen und der Oberfläche und sind von der Form der Spitze abhängig. Die kurzreichweitigen Kräfte herrschen nur zwischen den vordersten Atomen der Spitze und

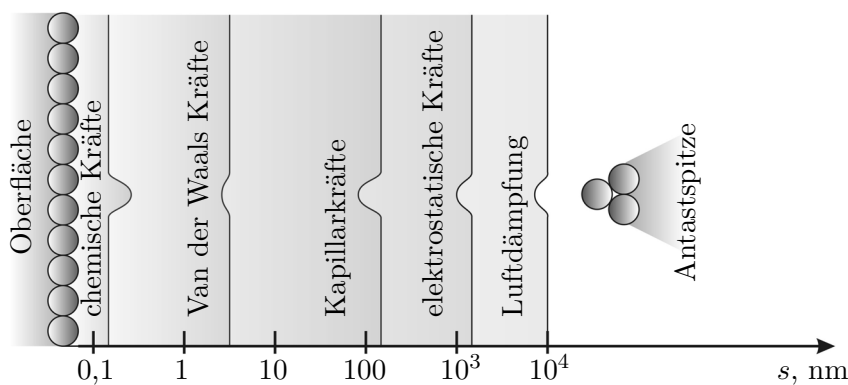


Abbildung 4.1:
Wechselwirkung zwischen Antastspitze und Oberfläche in Abhängigkeit vom Abstand s

⁴Es werden nur die wichtigsten Wechselwirkungskräfte aufgelistet. Für die unterschiedlichen Rastersondenverfahren haben auch weitere Kräfte Bedeutung, wie z. B. magnetostatische Kräfte für MFM.

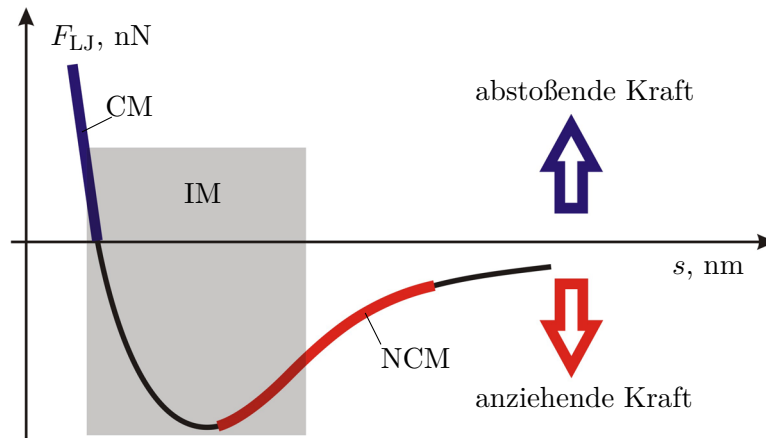


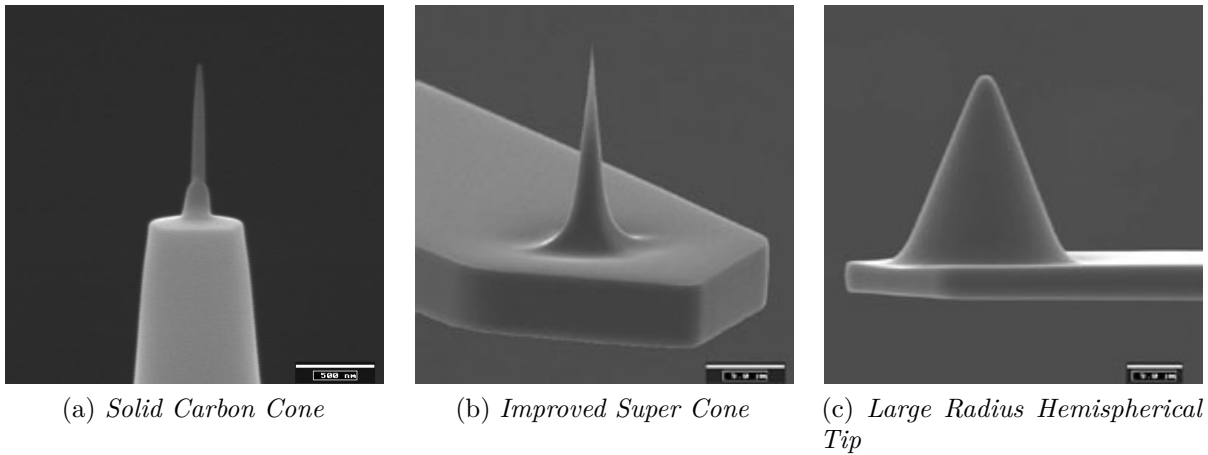
Abbildung 4.2: Wechselwirkungskraft F_{LJ} in Abhängigkeit vom Abstand s zwischen Antastspitze und Oberfläche mit den relevanten Bereichen für die Betriebsarten [97]:
 CM *Contact-Modus*,
 IM *Intermittent-Modus*,
 NCM *Non-Contact-Modus*

der Oberfläche. Die größte Reichweite (einige μm) haben bei der Messung (unter normalen Umgebungsbedingungen an Luft) abstoßende oder anziehende elektrostatische Kräfte (vgl. Abbildung 4.1). Sie sind für leitende Spitzen- und Oberflächenmaterialien üblich. An Luft können durch Kondensation von Wasser zwischen Spitze und Oberfläche anziehende Kapillarkräfte entstehen, die eine Reichweite von einigen 100 nm und Kräfte von 10 nN bis 100 nN betragen können [153]. In einer Entfernung von ein paar nm von der Oberfläche wirken anziehende Van-der-Waals-Kräfte auf die Spitze. Diese Wechselwirkung wird durch Schwankungen elektrischer Dipolmomente von Atomen der Spitze und Oberfläche und ihrer gegenseitigen Polarisierung verursacht. Wird die Antastspitze näher als 0,2 nm zur Oberfläche gebracht, so können sich die Elektronenhüllen der vordersten Spitzen- und Oberflächenatome nicht überlappen. Dies würde eine Verletzung des Pauliprinzip bedeuten, weshalb die kurzreichweitigen chemischen Kräfte abstoßende Charakter haben [67, 69, 153].

Durch die unterschiedlichen Abstandsgesetze ist eine Unterscheidung der Kräfte auch bei gleichzeitigem Auftreten möglich. Die elektrostatischen und Kapillarkräfte sind beeinflussbar. Die Van-der-Waals-Wechselwirkung und Pauli Repulsion können näherungsweise mit Hilfe des Lenard-Jones-Potentials beschrieben werden [67]. Abbildung 4.2 zeigt den daraus abgeleiteten qualitativen Verlauf der Wechselwirkungskräfte [45, 237] und seine Beziehung zu den verschiedenen Betriebsarten des AFM. Beim Abrastern der Oberfläche durch die Spitze müssen auch elastische und plastische Verformungen, Verschleiß, Reibung und der *Stick-Slip*-Effekt beachtet werden [237]. Ein gesamtheitliches Modell, das alle Einflussfaktoren sowie das Zusammenspiel der Wechselwirkungskräfte umfasst, ist sehr komplex, aber es existieren einige Leitfäden und Ansätze um es zu beschreiben [27, 28, 31, 36, 37, 92].

4.1.2 Antastspitze und *Cantilever*

Um die Messung der Wechselwirkungskräften im nN Bereich zu ermöglichen, wird eine 10 μm bis 15 μm lange pyramidenförmige Spitze auf ein freies Ende des einseitig eingespannten bzw. fixierten Biegebalkens, der im AFM als *Cantilever* bezeichnet wird, integriert (vgl. Abbildungen 4.3 und 4.4). Die Wechselwirkungskraft zwischen Messobjektoberfläche und Spitze führt dann zu einer Auslenkung (vor allem Durchbiegung) des *Cantilevers*. *Cantilever* mit Spitze werden als Sonde bezeichnet [180]. Sie sind aus Silizium oder Si-

Abbildung 4.3: *Cantilever* mit Antastspitze [212]

litziumnitrid mit den Verfahren der Halbleitertechnologie hergestellt und oft zusätzlich beschichtet. Silizium, das Grundmaterial für die Mikro- und Nanotechnik, hat die hervorragende physikalische Eigenschaft, den Strom bei steigender Temperatur besser zu leiten, ist ein sprödes und besonders hartes Material, behält seine elastischen Eigenschaften bis zur Bruchgrenze, sowie sind plastische Deformationen und Ermüdungserscheinungen nicht nachweisbar [171]. Die Antastspitze kann unterschiedliche Geometrien und Radien aufweisen: von *Nanotube* und *Carbon Cone* ($r < 3 \text{ nm}$) bis *Critical Dimension* und *Large radius hemispherical* ($r > 800 \text{ nm}$) [212]. Der Biegebalken ist je nach Typ zwischen $125 \mu\text{m}$ und $450 \mu\text{m}$ lang (L), bis $60 \mu\text{m}$ breit (W) und zwischen $1 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m}$ dick (T) (vgl. Abbildung 4.4). Alternativ gibt es auch *Cantilever* in Dreieckform [15]. Bedingt durch seine Geometrie liegt die Resonanzfrequenz f_0 zwischen 5 kHz und 350 kHz , die Federkonstante k von $0,01 \text{ N/m}$ bis 50 N/m , was für die Unterstützung der unterschiedlichen Betriebsarten entscheidend ist. *Cantilever* mit geringen Federkonstanten (bis ca. $1,5 \text{ N/m}$) und niedrigen Resonanzfrequenzen (bis 30 kHz) werden für die Messungen in statischen Betriebsarten (vgl. Abschnitt 4.1.3) benutzt. *Cantilever* mit größeren Federkonstanten (ab 2 N/m) und höheren Resonanzfrequenzen (ab 75 kHz) werden für die Messungen in dynamischen Betriebsarten (vgl. Abschnitt 4.1.3) benutzt.

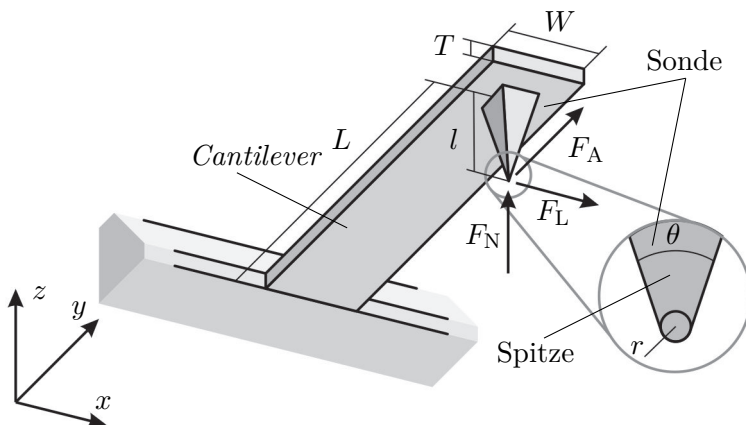


Abbildung 4.4: Rechteckige Sonde mit Länge L , Breite W , Dicke T , Höhe der Antastspitze l , Radius r und Öffnungswinkel θ ; normale (F_N), axiale (F_A), laterale (F_L) Kräfte wirken am Ende der Spitze

4.1.3 Betriebsarten

Mit der Sonde wird die Messobjektoberfläche abgetastet (vgl. Abbildung 4.5). Die relative Bewegung zwischen Sonde und Messobjekt wird durch eine Rastereinheit (x - y - und z -Scanner, vgl. Abschnitt 4.2, S. 28) realisiert. Die durch die Wechselwirkungskräfte verursachte Auslenkung des *Cantilevers* wird mit einem Lagedetektor (vgl. Abschnitt 4.3, S. 31) erfasst. Die einfachste Möglichkeit beim Abrastern der Oberfläche Informationen zu gewinnen, ist das Messsignal des Lagedetektors aufzuzeichnen. Der Lagedetektor liefert ein Signal, dass mit der Topographie der Oberfläche zusammenhängt. Diese Betriebsart heißt *Constant-Height*-Modus. D. h. die Sonde wird in konstanter Höhe über die Oberfläche geführt. Der *Constant-Height*-Modus ist nur für extrem ebene und glatte Oberflächen sowie für die bildliche Darstellung des Atomgitters geeignet [94]. Meistens wird beim Abrastern der Oberfläche die Auslenkung bzw. Biegung des *Cantilevers* mit dem z -Scanner in Antastrichtung (vgl. Abbildung 4.5) und einem Regelkreis konstant gehalten. Das ist *Constant-Force*-Modus, d. h. die Wechselwirkungskraft bleibt während der Messung konstant. Die eigentliche Messinformation wird aus der Stellspannung des z -Scanners oder mit zusätzlichen Längenmesssystemen gewonnen (vgl. Abschnitt 4.2, S. 28) und wird für die rechnergestützte Erstellung einer dreidimensionalen Abbildung der Oberfläche benutzt.

Abhängig vom Abstand zwischen Antastspitze und der Messobjektoberfläche während der Messung wird zwischen *Contact*-Modus (CM), *Intermittent*-Modus (IM) und *Non-Contact*-Modus (NCM) unterschieden (vgl. Abbildung 4.2). Der CM nutzt kurzreichweitige, abstoßende, der IM sowohl anziehende als auch abstoßende, während der NCM ausschließlich anziehende Wechselwirkungskräfte nutzt. Außerdem wird in statische und dynamische Betriebsarten unterschieden (vgl. Abbildung 4.6), in denen jeweils die statische Auslenkung des *Cantilevers* oder seine dynamischen Eigenschaften gemessen werden [153]. In statischer Betriebsart bzw. CM berührt beim Rastern die Antastspitze die Oberfläche ständig, wobei die statische Auslenkung des *Cantilevers* aufgezeichnet wird (*Constant-Height*-Modus) oder die Auslenkung des *Cantilevers* über einen Regelkreis konstant ge-

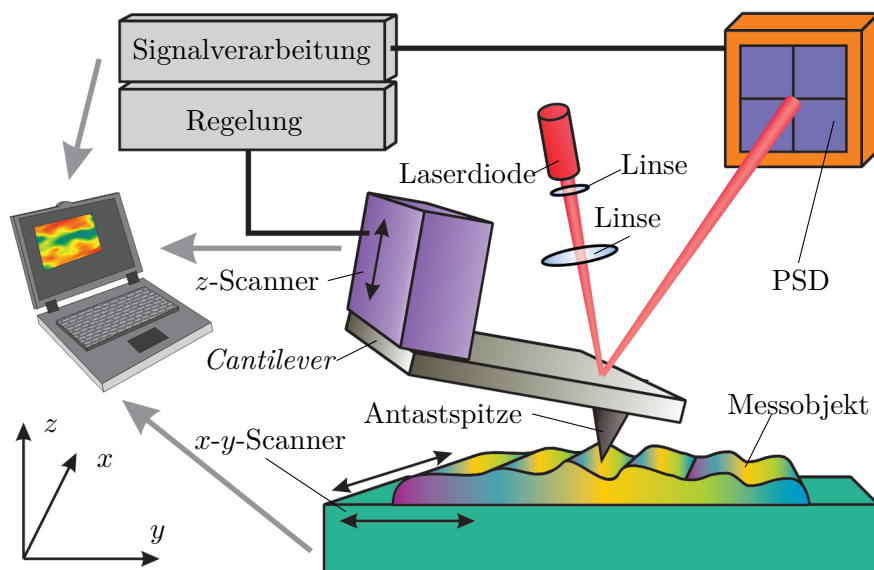


Abbildung 4.5: Prinzipschema eines AFM

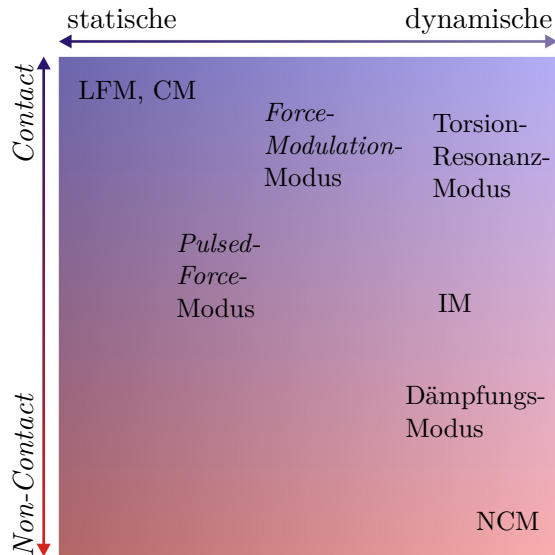


Abbildung 4.6: Betriebsarten eines AFM geordnet im Bezug des Abstands s zur Oberfläche:

Contact und *Non-Contact*, sowie Auslenkung der Sonde: statische und dynamische [153]

halten wird (*Constant-Force-Modus*). Von der Auslenkung wird mit der Federkonstante k des *Cantilevers* über das Hooke'sche Gesetz auf die wirkende Kraft geschlossen. Beim Abrastern der Oberfläche wird die Sonde aufgrund von lokalen Reibungskräften auch tordiert. Diese Reibungskräfte kann man zusätzlich zur Topographie aufzeichnen lassen (LFM) [153]. Zusätzlich können elastische und plastische Eigenschaften der Oberfläche sowie Adhäsionskräfte lokal untersucht werden [210]. Dies geschieht in Form von Kraft-Abstands-Kurven, bei denen die Sonde aus größerer Entfernung kontinuierlich an die Oberfläche herangefahren wird und nach Durchbiegung des *Cantilevers* bis zu einem vorgewählten Maximalwert wieder von der Probenoberfläche entfernt wird. Eine niedrige Federkonstante ($k < 1 \text{ N/m}$) des *Cantilevers* ist erforderlich, um große Kräfte zu vermeiden. Weiche und empfindliche Oberflächen können dabei allerdings trotzdem beschädigt werden. Außerdem können zu hoch ausgewählte Antastkräfte (bzw. Messkräfte) zu Verschleiß der Antastspitze und somit zu Verminderung der Auflösung führen. Diese Gefahr wird in dynamischen Betriebsarten verringert. In diesen Betriebsarten wird die Sonde in einem Abstand zu der Oberfläche durch einen Oszillator zur Schwingung angeregt, die nahe ihrer Resonanzfrequenz liegt. Sobald die Sonde sich der Oberfläche nähert, ändert sich aufgrund der Wechselwirkungskräfte die Frequenz, Amplitude und Phasenlage der Schwingung des *Cantilevers* gegenüber dem Anregungssignal [15]. Um einen konstanten Abstand zu der Oberfläche während der Messung zu gewährleisten, werden die Schwingungsparameter des *Cantilevers* geregelt. Die verwendeten *Cantilever* müssen steifer sein als in statischen Betriebsarten ($k > 2 \text{ N/m}$).

Die wichtigsten Vertreter dynamischer Betriebsarten sind IM und NCM. Im NCM (wird auch *Frequency-Modulation-Modus* genannt) beträgt der Abstand der Spitze zur Oberfläche bis zu 200 nm, was eine zerstörungsfreie Abbildung von Oberflächen ermöglicht. Die Sonde wird mit ihrer Resonanzfrequenz f_0 und sehr geringer Amplitude (einigen nm) zur Schwingung angeregt. Die Frequenzverschiebungen, welche durch die Abstandsänderung zwischen Antastspitze und Oberfläche und damit durch unterschiedlich starke Wechselwirkung hervorgerufen werden, werden dabei gemessen und zur Abstandsregelung benutzt. Um

unerwünschte Änderungen der Amplitude und der Phasenlage der Schwingung der Sonde gegenüber dem Anregungssignal zu vermeiden, sowie eine selbsterregende Schwingung zu gewährleisten, wird zusätzlich Selbststeuerung und Amplitudenregelung benutzt [1, 67, 72]. Der NCM wird im Vakuum betrieben und stellt hohe Anforderungen an die Regelelektronik. Eine Abwandlung des NCM ist der IM (wird auch *Amplitude-Modulation*-Modus genannt oder *Semicontact*-Modus, *Wave*-Modus (bei Ambios Technology Inc.), *Tapping*-Modus (bei Veeco Instruments Inc.)) in dem die Spitze im unteren Umkehrpunkt der Schwingung die Oberfläche antippt. Im Unterschied zum NCM wird die Sonde mit fester Frequenz unterhalb der Resonanzfrequenz und konstanter Amplitude zwischen 10 nm und 200 nm zur Schwingungen angeregt. Während der Annäherung der Sonde zur Oberfläche ändern sich die Wechselwirkungskräfte und somit die Resonanzfrequenz des *Cantilevers*. Da die Anregungsfrequenz aber konstant gehalten wird, ändern sich Amplitude und Phasenlage der Schwingung des *Cantilevers* gegenüber dem Anregungssignal. Die Änderung der Amplitude und (oder) Phase können als Maß für die Wechselwirkung und damit für den Abstand zwischen Antastspitze und Oberfläche dienen sowie für die Abstandsregelung genutzt werden [66, 72].

In den Tabellen 4.2 und 4.3 sind die Vor- und Nachteile sowie einige Eigenschaften der drei wichtigsten Betriebsarten (CM, IM, NCM) zusammengefasst. Weiterentwicklungen der oben beschriebenen statischen und dynamischen Betriebsarten sind z. B. Dämpfungs-Modus [72], Torsion-Resonanz-Modus [202], *Force-Modulation*-Modus und *Pulsed-Force*-Modus [151, 231]. Für die Messung von hinterschnittenen Strukturen werden neue Betriebsarten sowie Sonden erforscht [44, 105, 145, 169].

Betriebsart	Vorteile	Nachteile
CM	<ul style="list-style-type: none"> hohe Scangeschwindigkeit “atomare” laterale Auflösung einfacheres Scannen von Messobjekten mit extremen Höhenunterschieden in der Topographie 	<ul style="list-style-type: none"> laterale Kräfte (können das Messergebnis verfälschen) anziehende Kapillarkräfte (bewirken höhere Auflagekräfte auf die Messobjektoberfläche) Verformung und Abtragung von Antastspitze und Oberfläche
IM	<ul style="list-style-type: none"> hohe laterale Auflösung geringere Auflagekräfte als im CM beinah keine laterale Kräfte 	<ul style="list-style-type: none"> geringere Scangeschwindigkeit als im CM
NCM	<ul style="list-style-type: none"> sehr geringe Auflagekräfte empfindliche Messobjektoberflächen werden nicht beschädigt 	<ul style="list-style-type: none"> geringe laterale Auflösung langsame Scangeschwindigkeit anwendbar im Vakuum oder nur bei hydrophoben Oberflächen

Tabelle 4.2: Eigenschaften von Betriebsarten eines AFM [215]

Beschreibung	CM	IM	NCM
laterale Auflösung	++	+	–
Scangeschwindigkeit	++	+	–
Auflagekräfte	--	–	++
Verunreinigung und Abnutzung der Antastspitze	–	–	+
Verunreinigung und Abtragung der Messobjektoberfläche	--	–	+
Manipulation der Messobjektoberfläche	+	+	–
Realisierungsaufwand	++	+	–

Tabelle 4.3: Vor- und Nachteile der wichtigsten Betriebsarten eines AFM [215]

4.2 Rastereinheit

Die Rastereinheit (im Folgenden auch Scanner genannt) führt die Bewegung zwischen Sonde und Messobjekt aus. Wobei in der Ebene parallel zur Auflagefläche des Messobjektes (x - y -Ebene vgl. Tabelle 4.4) diese Bewegung rasterförmig vorgegeben ist⁵ und in Richtung des *Cantilevers* oder rechtwinklig zu ihm durchgeführt wird. Dabei sollen schnelle, lineare und hochauflösende Rasterbewegungen über möglichst große Bereiche gewährleistet werden.

Während des x - y -Scanvorgangs dient der z -Scanner zum Variieren des Abstandes zwischen Sonde und Messobjektoberfläche. Die mechanische Anordnung der Rastereinheit soll möglichst steif und klein sein, sowie die mit dem Scanner bewegte Masse möglichst gering sein, um eine höhere Eigenfrequenz und somit eine größere Scangeschwindigkeit zu ermöglichen.

Die Varianten, wie eine Rastereinheit in einem AFM angeordnet wird, sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Bei der „*Scanning Probe*“ und aufgeteilter Scanneranordnung muss nicht nur die Sonde, sondern auch der Lagedetektor bewegt werden, was zur Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften (Verringerung Eigenfrequenz) des Scanners führen kann. In AFM mit optischer Detektion wurden spezielle Anordnungen des Lagedetektors (vgl. Abschnitt 4.3.1) entwickelt, um der Erhöhung der bewegten Masse und der Verringerung der Eigenfrequenz des Scanners entgegenzuwirken. Durch die gleichzeitige Anordnung der Scanner oberhalb der Sonde und unterhalb des Messobjektes kann der Messbereich erweitert werden.

Als Scanner dienen im AFM meistens kompakte piezoelektrische – seltener elektromagnetische (x - y -Scanner in easyScan 2 bei Nanosurf AG) – Aktoren. Typische Bewegungsbereiche sind 10 μm bis 100 μm in x - y -Ebene sowie 2 μm bis 20 μm in z -Achse (Antastrichtung). Elektromagnetische Aktoren haben eine hohe Linearität und sind mit Niederspannung betreibbar. Allerdings sind diese Aktoren nicht selbsthemmend, d. h. wenn während des Betriebes der Scanner nicht bewegt wird, muss trotzdem elektrische Leistung aufgebracht werden. Piezoelektrische Aktoren zeichnen sich durch fast unbegrenzte Feinheit der Bewegung bis Sub-Nanometer, hohe Dynamik, schnelles Ansprechverhalten

⁵Ausnahme sind Messungen hinterschnittener Strukturen [44, 145], „echte“ dreidimensionale Messungen [40] sowie spezielle intelligente Messstrategien welche z. B. kreisförmigen Scans beinhalten [223].


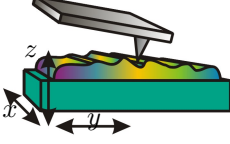
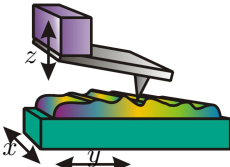
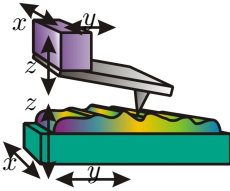
Bezeichnung	Beschreibung	Gerätebeispiel	Anordnung
<i>Scanning Probe</i>	Scanner ist oberhalb der Sonde angeordnet; beim Rastern wird die Sonde bewegt	DS 95-50/200 [46] easy-Scan 2 [160]	
<i>Scanning Sample</i>	Scanner ist unterhalb des Messobjektes angeordnet; beim Rastern wird das Messobjekt bewegt	attoAFM I [5], Veritekt [11]	
aufgeteilte Bewegung zwischen Messobjekt und Sonde	das Messobjekt wird in x - y -Ebene, die Sonde nur in z -Achse bewegt	XE-Serie [170]	
<i>Scanning Probe und Sample</i>	Scanner sind oberhalb der Sonde sowie unterhalb des Messobjektes angeordnet und können gleichzeitig eingesetzt werden	NTEGRA-Serie [168]	

Tabelle 4.4: Varianten zur Anordnung des Scanners

und Spielfreiheit aus [172]. Im statischen Betrieb benötigen sie außerdem praktisch keine Energie und erzeugen keine Wärme.

Es werden piezoelektrische Aktoren in unterschiedlicher Bauform eingesetzt: Piezoröhrchen, Stapeltranslatoren, Scherelemente und Bimorphe (als Oszillator). Ursprünglich wurden in STM Dreibein (*Tripod*) Scanner [18] – drei orthogonal zueinander stehenden Piezoaktoren (z. B. Stapeltranslatoren) – für die dreidimensionale Bewegung verwendet. Heutzutage werden meist Röhrchen-Scanner (*Tube-Scanner*) [20] in kommerziellen Geräten eingesetzt. Piezoröhrchen nutzen axiale und radiale Kontraktion aus. Bei speziellen Elektrodenanordnungen lassen sich mit einem einzigem Röhrchen sowohl laterale (x - y -Ebene) als auch vertikale (z -Achse) Bewegungen durchführen. Solche Röhrchen-Scanner haben einen leichteren mechanischen Aufbau und eine höhere Eigenfrequenz als Dreibein Scanner. Bei Rasterbewegungen in x - y -Ebene kommt es aufgrund nicht zu vermeidender Verbiegungen des Röhrchenendes, zu einem bogenförmigen Fehler in z -Richtung (Antastrichtung) wodurch es notwendig ist, zusätzliche Korrekturen durchzuführen, um eine ebene Messobjektoberfläche abzubilden. Alternativ werden x - y - z -Scanner mit integrierten Piezoaktoren und Festkörperführungen (*Flexuren*) (z. B. PicoCube™ bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. oder “*Parallel High-Speed Scanner*” [188] in TU Delft) und vom z - entkoppelte x - y -Scanner (z. B. Geräte XE-Serie bei Park Systems Corp.) benutzt.

Die Bewegung (mechanische Formänderung) piezoelektrischer Aktoren hat keinen linearen Zusammenhang mit der angelegten Stellspannung. Sie weist ein Hysteres- und Kriechverhalten auf und wird zusätzlich durch Alterung und thermische Drift beeinflusst.

Sensor	Auflösung	Messbereich	Anmerkungen
DMS	< 1 nm	15 μm	+ kompakt – Langzeit-Positionsstabilität hängt von der Güte der Klebeverbindung ab – indirektes Messverfahren
optisch	einige nm	einige 100 μm	+ kompakt und preisgünstig – kann thermische Drift im Scanner verursachen
induktiv (LVDT)	bis 5 nm	einige 100 μm	+ gute Langzeitstabilität und preisgünstig + misst direkt die Position (Direktmetrologie) – erzeugt Magnetfelder
kapazitiv	< 0,1 nm	$\leq 300 \mu\text{m}$	+ höchste Auflösung aller kommerziell verfügbaren Sensoren + gute Langzeitstabilität und Linearität – die Parallelität der Platten muss durch eine geeignete Konstruktion gewährleistet sein
Interferometer	< 0,1 nm	einige m	+ höchste Auflösung aller verfügbaren Messsystemen + direkte Rückführung über die Wellenlänge des Lasers auf die SI-Einheit der Länge – kostenaufwändig

Tabelle 4.5: Sensoren zur Positionsbestimmung in der Rastereinheit [45, 172, 236]

Diese Nichtlinearitäten betragen ca. 20 % bezogen auf den gesamten Bewegungsbereich [34] und haben einen Einfluss auf die Positionsbestimmung (des Messobjektes und/oder der Sonde während der Messung) aus der Stellspannung des Piezoaktors. Es ist möglich, das Hystereseverhalten rechnerisch zum Teil zu korrigieren: während der Messung (*online*) oder hinterher (*offline*), mittels speziellen Tabellen, mathematischen Verfahren oder Materialienmodellen [4]. Das Kriechverhalten und Drift können nach der Messung teilweise rechnerisch korrigiert werden [143]. Das nichtlineare Verhalten von Piezoaktoren kann während der Messung mittels zusätzlicher Sensoren ermittelt werden (*“open-loop”*-Betrieb) oder im positionsgeregelten Betrieb ausgeregelt werden (*“closed-loop”*). Die verbleibende Nichtlinearität beträgt oft weniger als 1 % bezogen auf den gesamten Bewegungsbereich. In der Tabelle 4.5 sind die Sensoren für die Positionsmessung aufgestellt. Neben der Sub-Nanometer Auflösung ist das Signal-Rausch-Verhältnis, die Langzeitstabilität, die Linearität und die Reproduzierbarkeit bei der Positionsmessung wichtig. In kommerziellen Geräten werden für die Positionsmessung meistens induktive und kapazitive Wegaufnehmer eingesetzt. Um quantitative Messungen durchführen zu können, müssen die Wegsensoren kalibriert werden, d.h. das Sensorsignal muss auf die Längeneinheit Meter zurückgeführt werden. Dies geschieht durch Aufzeichnung der Scannerbewegungen mittels Laserinterferometer oder durch Messung von kalibrierten Stufenhöhen- (*z*-Achse) und Lateralnormalen (*x-y*-Ebene). Interferometer als Wegsensoren werden in die Referenzgeräte oder MAFM integriert (vgl. Kapitel 2).

4.3 Methoden zur Erfassung der Sondenauslenkung

Zur Erfassung der Auslenkung der Sonde im AFM dient ein Lagedetektor. Die Auslenkung des *Cantilevers* führt zu Änderungen der Position sowie der Winkellage des freien Ende des Biegebalkens und zu mechanischen Spannungen im *Cantilever* selbst. Diese Änderungen können zur Detektion ausgenutzt werden. Bei der Auswahl des Detektors spielt nicht nur die Sub-Nanometer Auflösung eine Rolle, sondern es muss auch beachtet werden, dass das Messverfahren selbst nur minimal die Auslenkung der Sonde beeinflusst.

Im ersten AFM von G. Binnig, C.F. Quate und Ch. Gerber [17] wurde als Lagedetektor ein STM verwendet. Auf der Oberfläche des *Cantilevers* wurde eine Tunnelspitze angebracht, um die Auslenkung durch Tunnelströme zu detektieren. Trotz hoher Auflösung dieses Detektionsverfahrens hat es sich wegen der zusätzlichen Kraftwirkung der Tunnelspitze auf den *Cantilever* nicht durchgesetzt. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Deflektionsmessverfahren entwickelt (vgl. Tabelle 4.6). Kapazitive, piezoelektrische und piezoresistive Detektionsverfahren haben eine kompakte Bauform. Bei den kapazitiven Detektoren wird im Abstand von wenigen μm zum *Cantilever* eine Elektrode entgegengesetzt, so dass ein Kondensator entsteht. Dieses Verfahren zeichnet sich durch hohe Messdynamik und Auflösung aus, mit dem Nachteil, dass die Sonde während der Auslenkung die Gegenelektrode berühren kann [152]. Die piezoelektrische und piezoresistive Detektion erzielt wesentliche Vorteile durch die Integration des Detektors und des Aktors (für dynamische Betriebsarten) in die Sonde sowie durch die Anwendungsmöglichkeit in parallelen AFM-Array-Systemen [178]. Die Detektoren reagieren auf die mechanische Spannung im *Cantilever*, die bei der Auslenkung der Sonde entsteht. Piezoelektrische Lagedetektoren sind nicht für statische Betriebsarten geeignet. Bei der piezoresistiven Detektion wird

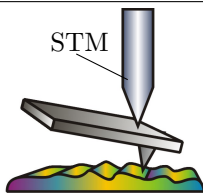
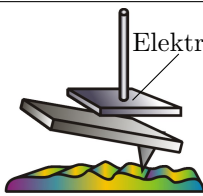
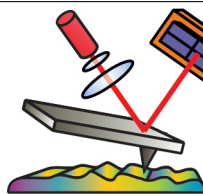
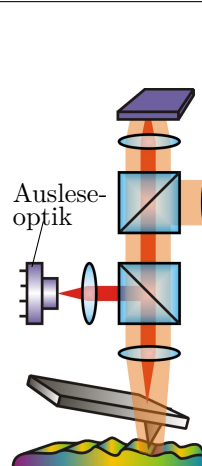
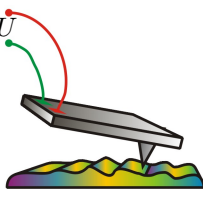
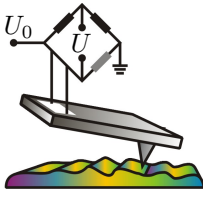

elektrische Detektoren		optische Detektoren	
 STM [17]	 kapazitiver Detektor [21]	 Lichtzeiger [155]	 CD/DVD-Ausleseoptik [100, 101, 126], Fokus-sensor [76, 138]
 piezoelektrischer Detektor [38, 89]	 piezoresistiver Detektor [179, 213]	 Interferometer [144, 159]	

Tabelle 4.6: Die Lagedetektoren [15, 152, 153, 237]

die Auflösung durch Widerstandsrauschen des Piezoresistors stark begrenzt [161]. Durch den ständigen Stromfluss wird der *Cantilever* erwärmt. Eine weitere Möglichkeit, der Integration des Auslenkungsdetektors und des Aktors in die Sonde besteht in dem Einsatz einer Quarzstimmgabel “*tuning fork*”[45, 59, 89].

In kommerziellen AFM sind optische Detektoren am meisten verbreitet. Bei diesen Lagedetektoren wird für die Erfassung der Auslenkung ein von der Oberfläche des *Cantilevers* reflektierter Lichtstrahl analysiert. Der Vorteil der optischen Detektion ist die große Auswahl der kommerziell erhältlichen Sonden sowie keinerlei Beschränkung bei den Betriebsarten. Dabei haben sich zwei Detektionsprinzipien durchgesetzt: das Lichtzeiger- und das Interferometerprinzip. Eine weitere Möglichkeit der Messung der Auslenkung bietet der Einsatz eines Fokussensors. Hier sind nur wenige Systeme bekannt, wie z. B. Veritekt [76] von Carl Zeiss Jena GmbH und ein AFM auf Basis eines Fokussensors [138] oder direkt auf Basis der Ausleseoptik eines CD/DVD-Laufwerkes [100, 101]. In den hochgenauen quantitativen Geräten als Lagedetektoren werden meistens Lichtzeiger und Interferometer eingesetzt (vgl. Anhang B, S. 155).

4.3.1 Lichtzeiger

Das Lichtzeigerprinzip beruht auf der Erfassung der durch die Auslenkung (Biegung und Torsion) der Sonde, bzw. durch die Veränderung ihrer Winkellage, verursachten Verlagerung des Lichtstrahls mittels Quadrantenfotodioden bzw. positionsempfindlichen Detektor (PSD) (vgl. Abbildung 4.5). Das Lichtzeigerprinzip zeichnet sich von anderen Verfahren durch die gleichzeitige und getrennte Erfassung von Biegung und Torsion des *Cantilevers* aus⁶.

Die zentralen Bestandteile des Lichtzeigers sind die Laserlichtquelle (üblicherweise eine Laserdiode) und ein positionsempfindlicher Detektor (PSD). Der Strahl wird auf das freie Ende der *Cantilever*-Oberfläche gerichtet, da dort die maximale Auslenkung und Änderung der Winkellage der Sonde während der Messung auftritt. Der reflektierte Strahl wird mit einem PSD erfasst. Die Verlagerungen des reflektierten Laserstrahls auf dem PSD entsprechen der Biegung und Torsion des *Cantilevers*.

Der erste Lichtzeiger als Lagedetektor in einem AFM wurde 1988 von G. Meyer und M. Amer vorgestellt [154]. Er beinhaltet einen He-Ne-Laser als Laserlichtquelle (1) und einen PSD (3). In einem idealen Lichtzeiger [175, 176] wird hinsichtlich des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Auflösung ein kollimierter Gaußstrahl von der Oberfläche des *Cantilevers* reflektiert und auf den PSD (3) fokussiert (vgl. Abbildung 4.7(a)). Der Bereich für die Reflektion des Laserstrahls vom *Cantilever* ist kleiner als 60 µm (Breite der Sonde W , vgl. Abschnitt 4.1.2, S. 23). Es ist bisher nicht möglich, einen kollimierten Laserstrahl mit einem solchen Durchmesser zu erstellen [175]. Außerdem können die unerwünschten Interferenzen zwischen dem vom *Cantilever* reflektierten Strahl und dem Streulicht von der Messobjektoberfläche beobachtet werden [98]. Die Störinterferenzen werden zusammen

⁶Bei spezieller Gestaltung der Sonde ist dies auch bei piezoresistiver Detektion möglich [179].

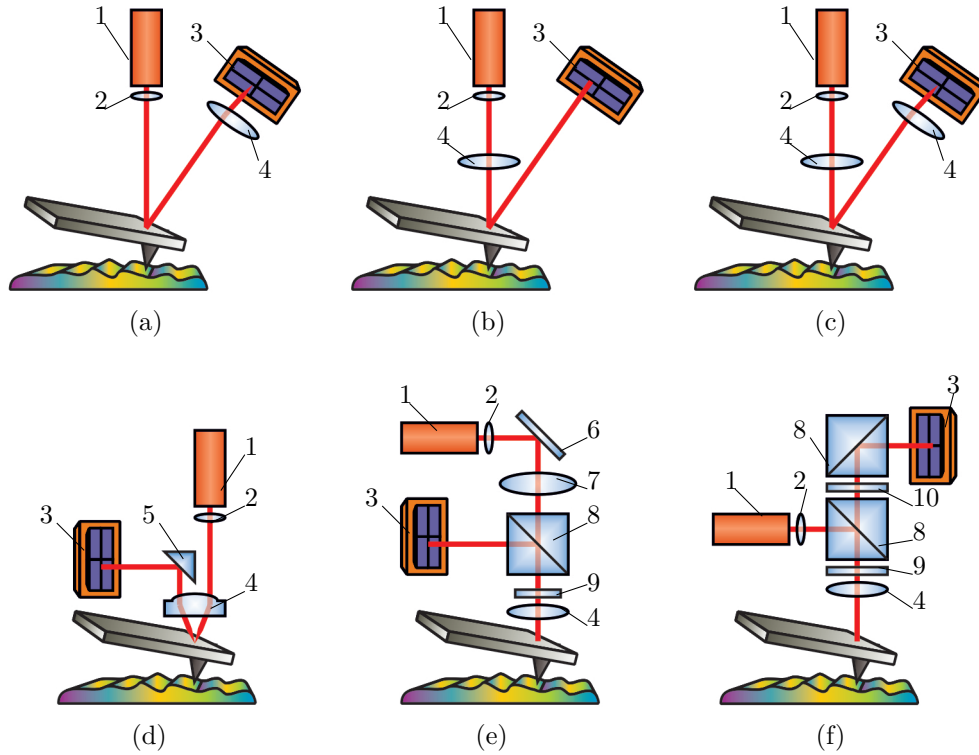


Abbildung 4.7: Anordnungen des Lichtzeigers: (a) ideale Anordnung [175, 176], (b) Standardanordnung, (c) verbesserte Anordnung [6], (d) Anordnung mit geometrischer Trennung [193], (e) Anordnung mit polarisationsoptischer Trennung [195, 200], (f) Anordnung mit polarisationsoptischer Trennung (Variante 2) [86] (1 Laserlichtquelle (Laser bzw. Laserdiode), 2 Kollimatorlinse⁷, 3 PSD, 4 Fokussierlinse, 5 Umlenkspiegel, 6 neutraler Strahlteiler (NT), 7 Linse, 8 polarisierender Strahlteiler (PT), 9 λ/4-Platte und 10 λ/2-Platte)

mit der Auslenkung des *Cantilevers* mit dem PSD erfasst. Dadurch sind sie in *Approach*- und Kraft-Abstands-Kurven “sichtbar” und beeinflussen somit die Topographiemessungen. Um Störinterferenzen zu vermeiden bzw. zu minimieren soll die Größe des Lichtspots viel kleiner als die Breite der Sonde sein. Somit stehen die Anforderungen an den auf den *Cantilever* gerichteten Laserstrahl bezüglich der Empfindlichkeit [175, 176] und den Störinterferenzen [98] in Widerspruch. Meistens wird der Laserstrahl auf die Oberfläche des *Cantilevers* fokussiert und zum PSD (3) gelenkt (vgl. Abbildung 4.7(b)).

Die theoretische maximal erreichbare Empfindlichkeit $\Delta S_y / \Delta z$ des Lichtzeigers hängt nur von der Taille w_{0f} des auf dem *Cantilever* fokussierten Strahls (begrenzt durch die Breite W des *Cantilevers*), der Lage des Fokuspunktes (der Länge L des *Cantilevers*) und der Wellenlänge λ des verwendeten Lasers ab [226]:

$$\frac{\Delta S_y}{\Delta z} = \frac{3\pi w_{0f}}{L\lambda} \quad (4.1)$$

⁷Die Kollimation ist in einigen Anordnungen optional.

und beläuft sich auf $\approx 8 \cdot 10^5$ [226] für einen handelsüblichen CM *Cantilever* mit einer Breite W von $50 \mu\text{m}$, Länge L von $450 \mu\text{m}$ und einem He-Ne-Laser als Laserlichtquelle.

Bei der Auslenkungserfassung nach dem Lichtzeigerprinzip werden mehrere Anordnungen unterschieden (vgl. Abbildung 4.7). Neben der idealen Anordnung [175, 176] (vgl. Abbildung 4.7(a)) und der Standardanordnung (vgl. Abbildung 4.7(b)) wurde eine sogenannte verbesserte Anordnung entwickelt [6]. In dieser Anordnung durchläuft der reflektierte Laserstrahl eine zusätzliche Linse (4) und wird auf dem PSD (3) fokussiert (Abbildung 4.7(c)). Ziel der Entwicklung war die Erhöhung der Auflösung sowie Verringerung der Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Schwingungen und Erschütterungen.

In der patentierten Anordnung [193] ist der einfallende Laserstrahl parallel zu der optischen Achse der Fokussierlinse (4) angeordnet (Abbildung 4.7(d)). Der einfallende und der von der Oberfläche des *Cantilevers* reflektierte Laserstrahl sind geometrisch getrennt. Die Komponenten des Lichtzeigers sind so orientiert, dass der Laserstrahl auf dem Weg von der Lichtquelle zum PSD niemals senkrecht auf eine ebene Oberfläche trifft. Der Durchmesser des auf den *Cantilever* fokussierten Laserspot beträgt $3 \mu\text{m}$ [193]. So sollen auch die Störinterferenzen, die durch Streulicht von der Messobjektoberfläche verursacht werden, vermieden werden.

In einer weiteren patentierten Anordnung [195, 200] sind einfallende und reflektierte Laserstrahlen mittels Polarisationsoptik getrennt (vgl. Abbildung 4.7(e)). Der Laserlichtstrahl ist linear polarisiert. Die Separierung erfolgt mittels eines polarisierenden Strahlteilers (PT) (8) und einer $\lambda/4$ -Platte (9). Der Laserstrahl ist senkrecht zu der Oberfläche der Sonde angeordnet, so dass der einfallende und der reflektierte Strahl sich überlappen. Der fokussierte Spot auf dem *Cantilever* wird mittels Justierung der beweglichen Linse (7) und Verlagerung des Laserstrahls eingestellt. Mittels Verkipfung des PSD (3) wird der reflektierte Strahl auf den Detektor zentriert. Eine ähnliche polarisationsoptische Anordnung wurde in einer Masterarbeit [86] (vgl. Abbildung 4.7(f)) vorgestellt. Eine zusätzliche $\lambda/2$ -Platte (10) dreht die lineare Polarisation des reflektierten Strahls um 90° . Somit wird der Strahl an der Teilerschicht des PT (8) reflektiert und gelangt zum PSD (9). In dieser Anordnung sind laterale Verschiebung des *Cantilevers* und Justierung der Fokussierlinse (4) entlang der optischen Achse für die Einstellung des fokussierten Laserspots auf dem *Cantilever* sowie die laterale Ausrichtung des PSD (3) in die Messbereichsmittle möglich. Im obersten Teil der beiden Anordnungen (vgl. Abbildung 4.7(e) und (f)) wird ein Kamerasystem integriert.

In Verbindung mit “*Scanning Probe*” oder aufgeteilter Anordnung des Scanners (vgl. Tabelle 4.4, S. 29) sind mehrere Ansätze zur Implementierung des Lichtzeigers möglich. Die Variante, mit dem mittels Scanner der Lichtzeiger mitbewegt wird, führt zur Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften des AFM. Wird nur die Sonde bewegt und ist der Lichtzeiger fix, führt dies zur einer starken Begrenzung des Scanbereiches bis auf einige μm [91]. Um den Scanbereich zu erweitern, werden die Fokussierlinse [198] (vgl. Abbildung 4.8(a)) oder die Laserdiode mit der Fokussierlinse [234] (vgl. Abbildung 4.8(b)) zusammen mit der Sonde mittels eines Röhren-Scanners (vgl. Abschnitt 4.2, S. 28)

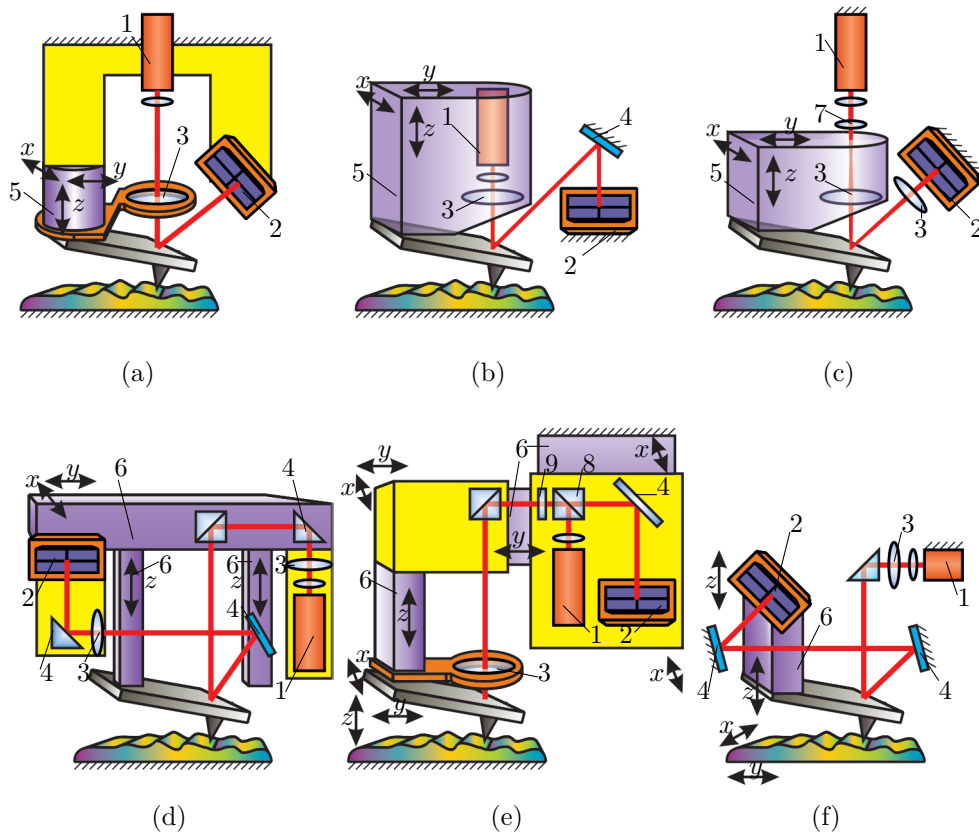


Abbildung 4.8: Anordnungen des Lichtzeigers in “*Scanning Probe*” Systemen: (a) Anordnung mit Strahlnachführung auf die Sonde (Variante 1) [198], (b) Anordnung mit Strahlnachführung auf die Sonde (Variante 2) [234], (c) Anordnung mit Strahlnachführung auf die Sonde und Kompensation der Bewegung der Sonde [74, 201], (d) Anordnung mit entkoppelten Scanner (Variante 1) [196], (e) Anordnung mit entkoppelten Scanner (Variante 2) [199], (f) Anordnung mit Kompensation der vertikalen Bewegung der Sonde [123, 197] (1 Laserlichtquelle (Laser bzw. Laserdiode), 2 PSD, 3 Fokussierlinse, 4 Umlenkspiegel, 5 Röhren-Scanner, 6 Scanner, 7 Linse, 8 PT, 9 $\lambda/4$ -Platte)

bewegt. In solchen Anordnungen bleibt der Laserstrahl auch bei der Bewegung der Sonde auf dieser fokussiert.

In einer weiteren Anordnung des Lichtzeigers, insbesondere im “*Scanning Probe*” System mit Röhren-Scanner, werden zusätzliche optische Komponenten für das Nachführen des Laserstrahls auf dem *Cantilever* während des Scanvorgangs eingesetzt [74, 201] (vgl. Abbildung 4.8(c)). Das Messsignal des PSD ist dadurch unabhängig von der Bewegung der Sonde und zeigt nur die Auslenkung des *Cantilevers* an.

Dank der Entkopplung der x - y -Scanner vom z -Scanner (vgl. Abbildung 4.8(d)) werden die Laserdiode und Fokussierlinse mit Umlenkprismen und PSD mit Korrekturlinse nur lateral bewegt. Ein Umlenkspiegel zusammen mit der Sonde wird mittels eines separaten z -Scanners bewegt [196] (vgl. Abbildung 4.8(d)). Der PSD erfasst dabei nur die Auslenkung des *Cantilevers*.

In der patentierten Anordnung [199] sind alle drei (x , y und z) Scanner entkoppelt (vgl. Abbildung 4.8(e)). Die x - und y -Piezoaktoren sind in Festkörperführungen integriert

(vgl. Abschnitt 4.2, S. 28). Der Lagedetektor ist so angeordnet dass die mit dem Scanner in Antastrichtung (vertikal) sowie in Scanrichtung bewegte Masse reduziert ist (vgl. Abbildung 4.8(e)). Der kollimierte Laserstrahl ist senkrecht zu der Oberfläche der Sonde angeordnet. Einfallende und reflektierte Laserstrahlen sind mittels Polarisationsoptik getrennt (vgl. Abbildung 4.7(e) und (f)). Nur die Auslenkung des *Cantilevers* führt zur Auswanderung des Laserstrahls auf dem PSD.

In Systemen der XE-Serie (Park Systems Corp.) [170] mit aufgeteilter Bewegung zwischen Messobjekt und Sonde (vgl. Tabelle 4.4, S. 29) wird der PSD zusammen mit dem *Cantilever* vertikal mitbewegt (vgl. Abbildung 4.8(f)). Um unerwünschte Auswanderung des Strahls auf dem PSD während der z -Bewegung des Scanners zu vermeiden, wird der reflektierte Laserstrahl mittels zwei festen Umlenkspiegeln zum PSD geführt (vgl. Abbildung 4.8(f)) [123, 197]. Bei einer Anordnung des Laserstrahls senkrecht zu der Sonde führt die z -Bewegung des Scanners lediglich zur Defokussierung und nicht zur Verlagerung auf dem PSD. Jegliche Strahlnachführung und Kompensation ist überflüssig.

Die Lichtzeiger mit polarisationsoptischer Trennung (vgl. Abbildungen 4.7(e) und (f), S. 33) sind für interferometrisches Sondenmesssystem besonders gut geeignet und können mit dem polarisationsoptischen Interferometer kombiniert werden.

4.3.2 Interferometrische Detektion am Beispiel eines Planspiegelinterferometers

Bei der Verwendung eines Interferometers als Lagedetektor werden die Interferenzen von Laserlicht bei Änderung der Auslenkung des *Cantilevers* bzw. seiner Positionsänderung registriert, gemessen und abgezählt. Die Wellenlänge des Laserlichtes bildet einen Maßstab, mit dem die zu messende Auslenkung direkt verglichen werden kann. Mit dem Funktionsprinzip ist die Messung auf nationale und internationale Längennormale rückführbar. Allerdings hat die Anwendung der Laserinterferometrie meistens einen hohen Kostenfaktor. Es lassen sich verschiedene Arten von Interferometern wie z.B. nach dem Heterodyn- [23, 33, 114, 144, 186] und Homodynprinzip [60] oder Nomarski [3], Mirau [194] auch Weißlichtinterferometer [228] und Fabry-Pérot [95, 183] sowie besonders kompakte Faserinterferometer [159, 184] einsetzen. Mit den interferometrischen Lagedetektoren ist es möglich die Auslenkungen nicht nur einer Sonde sondern eines *Cantilever*-Array (9 *Cantilever*) zu detektieren [33] sowie die Abstandsänderungen zwischen dem freien Ende des *Cantilevers* und der Messobjektoberfläche zu messen [186] oder dem festen *Cantilever*-Ansatz zu erfassen [3].

Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der TU Ilmenau werden schon seit vielen Jahren Interferometer für unterschiedlichen Anwendungen entwickelt [10, 12, 107]. Das Verfahren des polarisationsoptischen Homodyninterferometers mit Planspiegelreflektoren basiert hauptsächlich auf Forschungsarbeiten von Dr. H. Büchner [10, 12]. Dieses Interferometerprinzip wird auch in der NMM-1 eingesetzt [80, 81, 189]. Großer Vorteil des

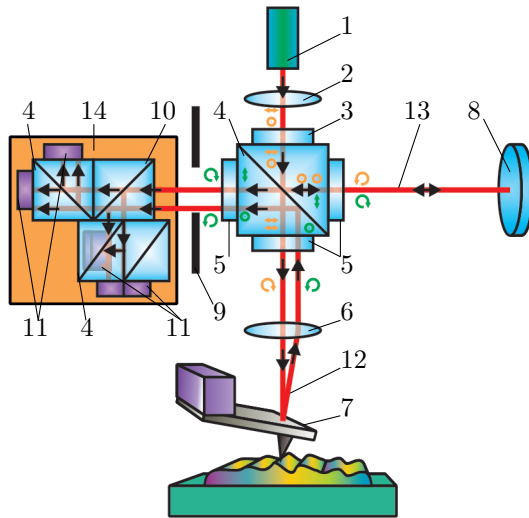


Abbildung 4.9: Polarisationsoptisches Planspiegelinterferometer mit Messstrahlfokussierung (1 LWL, 2 Kollimatorlinse, 3 Polarisationsfilter (PF), 4 polarisierender Strahlteiler (PT), 5 $\lambda/4$ -Platte, 6 Fokussierlinse, 7 Oberfläche des *Cantilevers* als Messspiegel, 8 Referenzspiegel, 9 Blende, 10 neutraler Strahlteiler (NT), 11 Fotoempfänger, 12 Messarm, 13 Referenzarm, 14 Auswerteeinheit)

Interferometers nach dem Homodynprinzip⁸ liegt in der Möglichkeit der Lichtwellenleiterkopplung des Laserlichts ins Interferometer. Dadurch entsteht eine räumliche und somit thermische Trennung der Messaufbau von der Wärmequelle des Lasers [139].

Die theoretischen Grundlagen der Interferometrie sind in [14, 47] erklärt. Die unterschiedlichen interferometrischen Verfahren und Interferometeranordnungen sind in [13, 70, 139] behandelt. Die theoretischen Zusammenhänge zur Beschreibung der Interferenzentstehung im polarisationsoptischen Homodyninterferometer sowie die Erklärung der Funktionen seiner wichtigsten Baugruppen sind in [48] zusammengefasst.

Für den Einsatz des polarisationsoptischen Homodyninterferometers mit Planspiegelreflektor als Lagedetektor der *Cantilever*-Auslenkung kann ein unstabilisierter He-Ne-Laser als Quelle des linearpolarisierten Laserlichts dienen. Der Einsatz eines stabilisierten He-Ne-Laser ist nicht notwendig [139], da der Messbereich des Interferometers des Sondenmesssystems einige μm nicht überschreitet. Die Wellenlängenstabilität des Lasers $\Delta\lambda_0/\lambda$ beträgt $3 \cdot 10^{-7}$ [107] und die Laserleistung ca. 1 mW. Für die Erfassung der *Cantilever*-Auslenkung ist der Interferometermessstrahl auf die Oberfläche des *Cantilevers* fokussiert. Abbildung 4.9 stellt das Prinzip des Homodyninterferometers mit einer Fokussierlinse (6) im Messarm (12) dar. Der Messbereich des Interferometers ist auf den Bereich der Tiefenschärfe (Rayleigh-Länge) des fokussierten Laserstrahls beschränkt. Die Fokussierlinse und die reflektierende Oberfläche des *Cantilevers* verhalten sich zusammen wie ein kippinvarianter Retroreflektor. Voraussetzung für die Interferenz ist die Überlappung von beiden Teilstrahlen von Mess- (12) und Referenzarm (13) sowie eine möglichst orthogonale Anordnung des Referenzspiegels zur Oberfläche des *Cantilevers*. Die Interferenzintensität I kann durch die Gleichung (4.2) beschrieben werden [73]:

$$I = I_r + I_m + 2\sqrt{I_r I_m} \cos(\varphi). \quad (4.2)$$

⁸Das Homodyninterferometer nutzt ein Einfrequenzverfahren mit Laserlicht in Mess- und Referenzarm von gleicher Wellenlänge.

φ stellt die Phasendifferenz zwischen dem Mess- und Referenzstrahl dar. Die Änderung der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ wird bei konstanter Referenzarmlänge durch die Änderung der Messarmlänge ΔL_m verursacht:

$$\Delta\varphi = \frac{2\Delta L_m}{\lambda} 360^\circ. \quad (4.3)$$

Die Änderung der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ um 360° oder 2π (eine volle Periode) entspricht einer Interferenzordnung sowie einer Bewegung des *Cantilevers* (Messspiegels) von $\lambda/2$ ($\Delta L_m = \lambda/2$). Die theoretische Empfindlichkeit des Interferometers entspricht der maximalen Steigung der Kosinusfunktion und beträgt $\Delta I/I_0 \Delta z \gg \frac{4}{\lambda} \approx 6.3 \cdot 10^6$ [226]. Die Auswertung (Demodulation) des Interferenzsignals basiert auf der Aufzählung der durchgelaufenen vollen Perioden unter Berücksichtigung der Vor-Rückwärts-Zählung und auf der Ermittlung der Bruchteile der Signalperiode bzw. Phase mittels arctan-Verfahren ab dem Anfang der Messung [77]. Das Messergebnis l_m bestimmt man aus dem Zählerstand N , der Wellenlänge λ und dem Teilungs- bzw. Interpolationsfaktor k_{TF} [81, 139]:

$$l_m = \frac{\lambda}{2k_{TF}} N. \quad (4.4)$$

Die Elektronikeinheit der NMM-1 arbeitet mit dem Teilungsfaktor $k_{TF} = 2^{14} = 16384$. Somit kann eine nominelle Auflösung von 20 pm erreicht werden. Die Messauflösung des Interferometers ist nicht nur von der A/D-Wandler- und arctan-Registerbreiten des Demodulationsmoduls, sondern auch vom Rauschen der Interferenzsignale abhängig [81]. Ein polarisationsoptisches Homodyninterferometer mit Planspiegelreflektor kann mit dem Lichtzeiger mit polarisationsoptischer Trennung (vgl. Abbildung 5.1) kombiniert werden und als Lagedetektor in einem interferometrischen Sondenmesssystem dienen.

5 Interferometrisches Sondenmesssystem

Die wichtigste Baugruppe des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM) ist das Sondenmesssystem zur Ermittlung der Biegung, der Torsion und der Position des *Cantilevers*. Neben der Langzeitstabilität des Gesamtsystems und der Reproduzierbarkeit der Antastung soll die Messung des LiAFM auf nationale und internationale Normale rückführbar sein.

Nachfolgend werden die Prinzipien der gleichzeitigen Erfassung von Position und Winkellage des freien Ende des *Cantilevers* mittels Planspiegelinterferometer und Lichtzeiger ausführlich erklärt. Insbesondere werden die unterschiedlichen optischen Anordnungen und die Dimensionierung des Sondenmesssystems erläutert.

5.1 Das Prinzip der gleichzeitigen Erfassung von Position und Winkellage

Ausgehend von der Darstellung der Detektionsprinzipien und dem Vergleich der wichtigsten Deflektionsmessverfahren (vgl. Abschnitt 4.3, S. 31) sowie aufgrund der Anforderungen an das Sondenmesssystem, kommen Lichtzeiger und Interferometer als Lagedetektoren zum Einsatz.

Eine gleichzeitige Erfassung der Winkellage und der Position des *Cantilevers* mittels Lichtzeiger und Interferometer wurde von einigen Forschergruppen umgesetzt [65, 96, 239]. Alle diese Entwicklungen hatten ein ähnliches Ziel: unterschiedliche Kräfte (normale F_N , achsiale F_A , laterale F_L vgl. Abbildung 4.4, S. 24), die an der Antastspitze wirken, zu erfassen, zwischen Durchbiegung, Torsion und Positionsänderung des *Cantilevers* zu unterscheiden, sowie zusätzliche Informationen über die Wechselwirkungskräfte zu gewinnen. Die Strahlengänge beider Lagedetektoren sind in diesen entwickelten AFM getrennt.

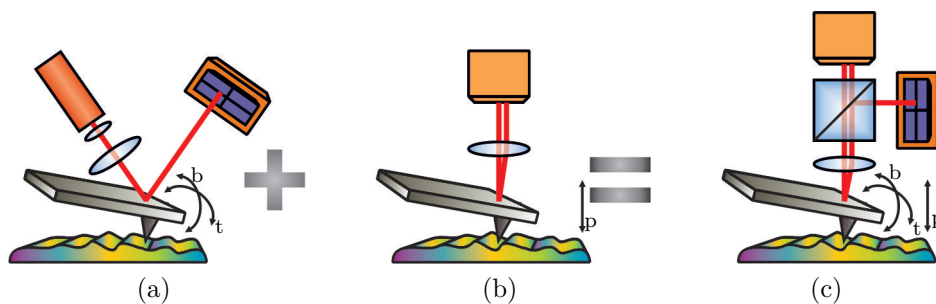


Abbildung 5.1: Prinzip gleichzeitiger Erfassung der Position- und Winkellage der Sonde: (a) Lichtzeiger, (b) Interferometer, (c) kombinierter Lagedetektor mit einem gemeinsamen Messstrahl (b Biegung, t Torsion, p Positionsänderung)

Eine viel elegantere Lösung bzw. ein anderer Ansatz ist es, beide Lagedetektoren zu integrieren, um mit einem gemeinsamen fokussierten Laserstrahl auf der Sonde messen zu können [51, 53]. Das Konzept des kombinierten Sondenmesssystems mit einer Laserlichtquelle und einem Messstrahl (vgl. Abbildung 5.1(c)) wird in dieser Arbeit verfolgt. Das gleiche Konzept setzte eine britische Forschergruppe bei einem AFM mit einer “*Scanning Probe*”-Anordnung und einem Messbereich von $36\text{ }\mu\text{m} \times 36\text{ }\mu\text{m}$ ein [99]. Es existieren zahlreiche Möglichkeiten und Varianten, Lichtzeiger und Interferometer zu kombinieren. Zwei entwickelte, aufgebaute und untersuchte Varianten dienten als Grundlage zur Konzipierung eines interferometrischen Sondenmesssystem mit einem gemeinsamen Messstrahl und werden in Abschnitt 5.3 ausführlich vorgestellt.

5.2 Dimensionierung des interferometrischen Sondenmesssystems

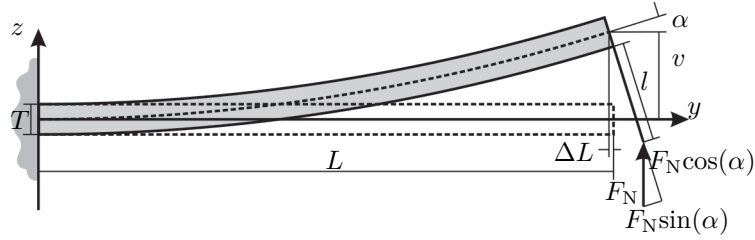
Eine der Anforderungen an das Sondenmesssystem ist die Messauflösung im Subnanometerbereich. Neben dem Interferometer muss der Lichtzeiger ebenfalls entsprechend hochauflösend und empfindlich gestaltet werden, um die Auslenkung bzw. Winkeländerung des freien Ende des *Cantilevers*, welche durch eine vertikale Verschiebung der Antastspitze um $<0,1\text{ nm}$ hervorgerufen wird, zu detektieren.

Die Dimensionierung des Sondenmesssystems ist von der Geometrie und den Eigenschaften des *Cantilevers* (vgl. Abschnitt 4.1.2, S. 23) abhängig. Um den Einsatz von einer möglichst großen Vielfalt von Sonden zu ermöglichen, wurden aus deren Parametern jeweils die Extremwerte zur Dimensionierung verwendet.

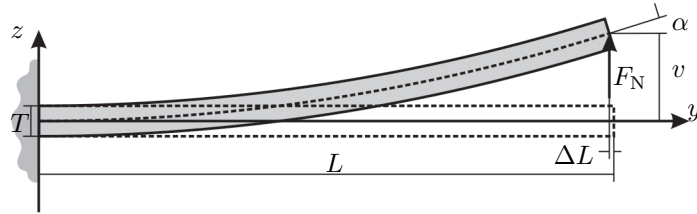
Bei dem Lichtzeiger wird nicht die direkte Auslenkung der Sonde gemessen sondern der Winkel der Durchbiegung des *Cantilevers*. Für die Dimensionierung kann die Durchbiegung des *Cantilevers* mittels FEM-Analysen ermittelt werden oder theoretisch mit der Annahme eines einfachen Biegebalkens berechnet werden (vgl. Abbildung 5.2(a)). Für die theoretische Betrachtung gelten folgende Vereinfachungen: der *Cantilever* besteht aus einem elastischen homogenen Material, hat einen konstanten Querschnitt, ist einseitig eingespannt und wird am freien Ende durch eine Kraft F_N belastet. Der lokale Krümmungsradius ist immer sehr viel größer als die Breite W und Dicke T des *Cantilevers*. Weiterhin wird nicht berücksichtigt, dass die Anordnung des *Cantilevers* nicht parallel sondern in einem Winkel von z. B. 7° zur Messobjektoberfläche steht.

Die Differentialgleichung zweiter Ordnung (5.1) [88] ist der Ausgangspunkt für die Beschreibung des Zusammenhanges zwischen der Durchbiegung v des *Cantilevers* und der Kraft F_N :

$$\frac{d^2v}{dy^2} = \frac{M_{bx}(y)}{EI_x} \quad (5.1)$$



(a) Kraftangriffspunkt außerhalb der neutralen Faser



(b) Kraftangriffspunkt innerhalb der neutralen Faser

Abbildung 5.2: Modell des *Cantilevers* als einfacher Biegebalken

mit dem axialen Flächenträgheitsmoment I_x und dem Elastizitätsmodul E des *Cantilevers*. Die Differenziation der Durchbiegung v ergibt den Neigungswinkel α :

$$\frac{dv}{dy} = \tan(\alpha). \quad (5.2)$$

Das Biegemoment M_{bx} gemäß der Abbildung 5.2(a) lautet:

$$M_{bx}(y) = F_N \cos(\alpha)(L - y) + F_N \sin(\alpha)l. \quad (5.3)$$

Bei kleinen Durchbiegungen v ist der Neigungswinkel α auch sehr klein [88]. Außerdem ist die Höhe (Länge) l der Antastspitze viel kleiner als die Länge L des Biegebalkens ($l \ll L$). Somit ist die Höhe l der Antastspitze vernachlässigbar und die Kraft wirkt innerhalb der neutralen Faser des *Cantilevers* (vgl. Abbildung 5.2(b)). Aufgrund dieser Vereinfachung kann die Gleichung M_{bx} in folgender Form umgeschrieben werden:

$$M_{bx}(y) = F_N(L - y). \quad (5.4)$$

Aus den Gleichungen (5.1), (5.2) und (5.4) erhält man durch Integration unter Berücksichtigung der Integrationskonstanten und der Randbedingungen die Biegelinie $v(y)$:

$$v(y) = \frac{F_N y^2}{6EI_x} (3L - y) \quad (5.5)$$

und den Neigungswinkel $\alpha(y)$:

$$\tan(\alpha) = \frac{F_N y}{2EI_x} (2L - y). \quad (5.6)$$

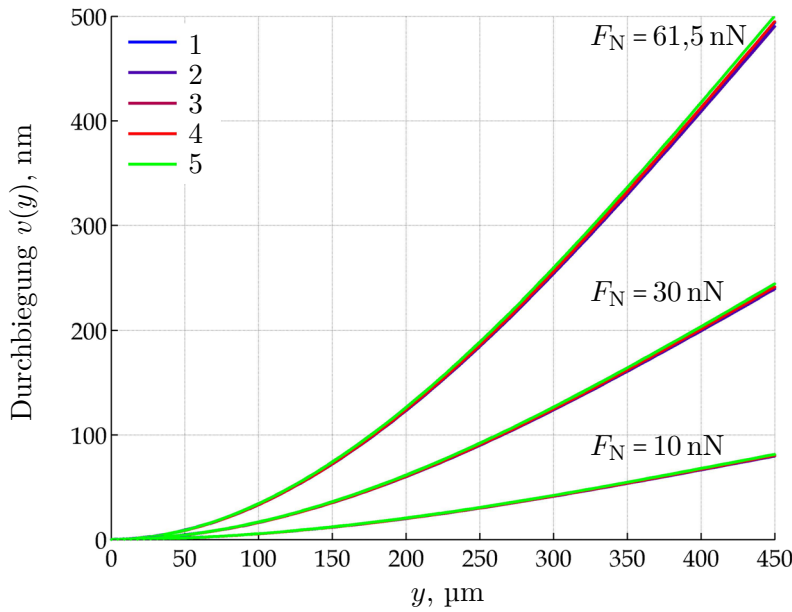


Abbildung 5.3: Biegelinie verschiedener Modelle des *Cantilevers* bei Belastung durch unterschiedliche Kräfte F_N :

- 1 *Cantilever* mit Trägerchip und Spitze (FEM-Analyse),
- 2 *Cantilever* mit Spitze (FEM-Analyse),
- 3 Biegebalken mit Spitze (FEM-Analyse),
- 4 Biegebalken (FEM-Analyse),
- 5 Biegebalken (theoretische Betrachtung)

Um die Richtigkeit der theoretischen Beschreibung der Durchbiegung des *Cantilevers* (vgl. Gleichung 5.5) zu überprüfen, wurden verschiedene FEM-Analysen durchgeführt. Es wurden vier unterschiedliche Modelle mit unterschiedlichem Konkretisierungsgrad des *Cantilevers* analysiert (vgl. Anhang C, S. 161). Die ermittelten Biegelinien (1–4) und die errechnete Biegelinie (5) nach Gleichung (5.5) sind in der Abbildung 5.3 dargestellt. Alle Biegelinien stimmen gut überein. Somit ist die Annahme eines einfachen Biegebalkens mit dem Kraftangriffspunkt innerhalb der neutralen Faser (vgl. Abbildung 5.2(b) und Gleichung (5.5)) für die Beschreibung der Durchbiegung des *Cantilevers* gut geeignet [226].

Durch Einsetzen von $y = L$ und $v(L) = z$ in die Gleichungen (5.5) und (5.6) wird der Neigungswinkel α am freien Ende des *Cantilevers* in Abhängigkeit von der Durchbiegung v ermittelt (vgl. Gleichung (5.7)):

$$\tan(\alpha) = \frac{F_N L^2}{2EI_x} = \frac{3z}{2L}. \quad (5.7)$$

Der Messbereich des Lichtzeigers soll die Detektion der Auslenkungen des *Cantilevers* im *Contact-Modus* (CM) bis $\pm 1 \mu\text{m}$ ermöglichen. Ausgehend von Gleichung (5.7) ergibt sich ein Messbereich von $\pm 10'$. Der laterale Versatz ΔL des freien Ende des *Cantilevers* (vgl. Abbildung 5.2) wird dabei $< 1 \text{ nm}$ betragen.

Im interferometrischen Sondenmesssystem wird mit einem gemeinsamen Laserstrahl auf dem *Cantilever* gemessen (vgl. Abbildung 3.1, S. 20). Dies macht eine Kombination der Optik des Interferometers und des Lichtzeigers erforderlich. Dadurch wird eine Laserlichtquelle eingespart und die Anzahl der Bauteile reduziert. Das Sondenmesssystem besteht aus dem im Abschnitt 4.3.2, S. 36 beschriebenen polarisationsoptischen Planspiegelinterferometer nach dem Homodynprinzip. Daraus resultiert die wie im Abschnitt 4.3.1 in Abbildungen 4.7(e) und (f) (S. 33) dargestellte Anordnung des Lichtzeigers. Der reflektierte Messstrahl im interferometrischen Sondenmesssystem durchläuft die Fokussierlinse (vgl.

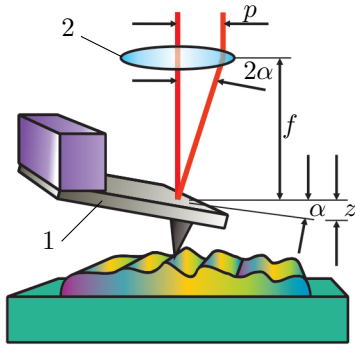


Abbildung 5.4: Prinzip der Fokussierung des Messstrahls (1 *Cantilever*, 2 Fokussierlinse)

Abbildung 5.4) und die Neigung α des *Cantilevers* verursacht dann einen Parallelversatz p des Messstrahls nach der Fokussierlinse:

$$p = f \tan(2\alpha). \quad (5.8)$$

Dieser Parallelversatz wird mittels PSD erfasst. Der Parallelversatz p führt beim Interferometer (vgl. Abschnitt 4.3.2) zu einer Verschlechterung des Interferenzsignals.

Bei der Dimensionierung des optischen Sondenmesssystems wurden folgende Einflussparameter in Betracht gezogen: der Durchmesser des kollimierten Messstrahls $2w'_{0\text{kol}}$ und die Brennweite f der Fokussierlinse. Gleichung (5.9) beschreibt in der vereinfachten Form den Zusammenhang zwischen der Strahltaile $w_{0\text{kol}}$ bei Verlassen des LWL, Taille $w_{0\text{f}}$ des fokussierten Laserstrahls und beiden Linsenbrennweiten f_{kol} und f [226]:

$$w_{0\text{f}} \approx \frac{f}{f_{\text{kol}}} w_{0\text{kol}}. \quad (5.9)$$

Durch Auswahl dieser Parameter werden der Durchmesser $2w_{0\text{f}}$ des auf den *Cantilever* fokussierten Messstrahls, maximal detektierbare Neigung des *Cantilevers*, Messbereich und Empfindlichkeit des Lichtzeigers, Messbereich des Interferometers bestimmt.

Die ausführlichen numerischen Berechnungen basieren auf der Gaußschen Strahltheorie (vgl. Anhang D, S. 163), da der Laserstrahl im Idealfall ein Gaußstrahl ist [47]. Und für deren Übersichtlichkeit wird ein aufgeklappter Strahlengang des Sondenmesssystems nach Abbildung 3.1 (S. 20) benutzt [226]. Der aufgeklappte Verlauf des Messstrahls des interferometrischen Sondenmesssystems von dem Austritt aus dem LWL bis zu den Empfängern (PSD und Fotoempfänger der interferometrischen Auswerteeinheit) ist vereinfacht in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Taille $w_{0\text{kol}}$ des Laserstrahls beträgt bei verlassen des LWL $1,9 \mu\text{m}$ [139]. In [139] wird empfohlen für die interferometrische Messungen die Kollimationsbrennweite $f_{\text{kol}} \approx 10 \text{ mm}$ zu wählen. Für die Berechnungen werden die Kollimatorlinsen mit den Brennweiten f_{kol} von $7,6 \text{ mm}$ und 11 mm eingesetzt. Die Tailen $w'_{0\text{kol}}$ des kollimierten Strahls nach Gleichung (D.4), S. 163 betragen entsprechend $0,81 \text{ mm}$ bzw. $1,17 \text{ mm}$.

Die Lage $z'_{0\text{kol}}$ und die Größe der Taille $w'_{0\text{kol}}$ des kollimierten Laserstrahls hängen von der Brennweite f_{kol} der Linse und dem Abstand $z_{0\text{kol}}$ des LWL zum Brennpunkt der Linse (bzw. vom Justagefehler, z. B. $z_{0\text{kol}} < 1 \mu\text{m}$) ab (vgl. Abbildung 5.5). Zur Vereinfachung

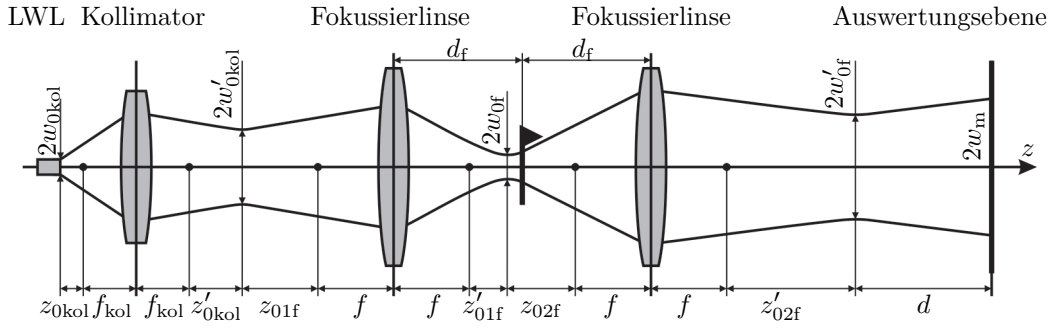


Abbildung 5.5: Aufgeklappter Strahlengang des Laserstrahls im Sondenmesssystem

der Berechnungen wird angenommen, dass die Taille w'_{0kol} des kollimierten Strahls in der objektseitigen Brennebene der Fokussierlinse liegt. Somit ist $z_{01f} = z'_{01f} = 0$. Wenn der *Cantilever* auf der bildseitigen Brennebene der Fokussierlinse justiert ist, gilt $d_f = f$ und $z'_{02f} = 0$.

Für die Berechnungen der auf dem *Cantilever* fokussierten Strahltaille w_{of} werden die Fokussierlinsen mit Brennweiten f von 30...50 mm eingesetzt (vgl. Abbildung 5.6). Der Kollimator mit der Brennweite f_{kol} von 11 mm ermöglicht tendenziell kleinere Strahldurchmesser $2w_{of}$ auf dem *Cantilever* (vgl. Abbildung 5.6(a)) und geringere Rayleigh-Länge z_{Rf} (die Tiefenschärfe) des fokussierten Strahls. Da die Breite des Biegebalken W bei den unterschiedlichen Typen der Sonden zwischen 20 und 60 μm variiert, ist der Einsatz von Fokussierlinsen mit Brennweiten $f > 40$ mm zusammen mit der Kollimatorlinse der Brennweite f_{kol} von 7,6 mm kritisch.

Auslenkungen des *Cantilevers* von $\pm 1 \mu\text{m}$ während der Messung führen nur zur geringfügigen Vergrößerung ($< 1 \text{ nm}$) des Strahldurchmesser auf dem *Cantilever*. Neben der Auslenkung kann auch eine fehlerhafte Justierung des *Cantilevers* eine Vergrößerung

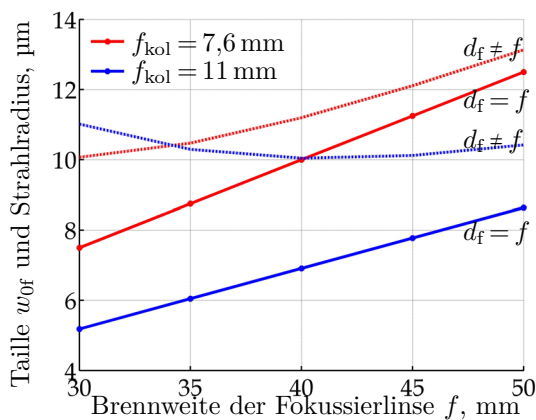
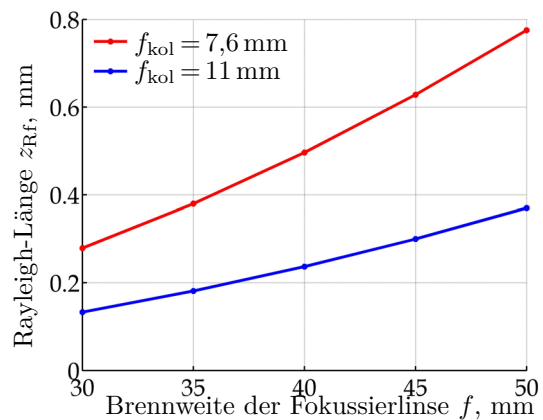
(a) Taille w_{of} des fokussierten und Radius des defokussierten Laserstrahls(b) Rayleigh-Länge z_{Rf} des fokussierten Laserstrahls

Abbildung 5.6: Berechnete Taille w_{of} und Rayleigh-Länge z_{Rf} des auf dem *Cantilever* fokussierten Laserstrahls ($d_f = f$) in Abhängigkeit von den Brennweiten des Kollimators f_{kol} und der Fokussierlinse f , Einfluss von Justagefehler ($d_f \neq f$)

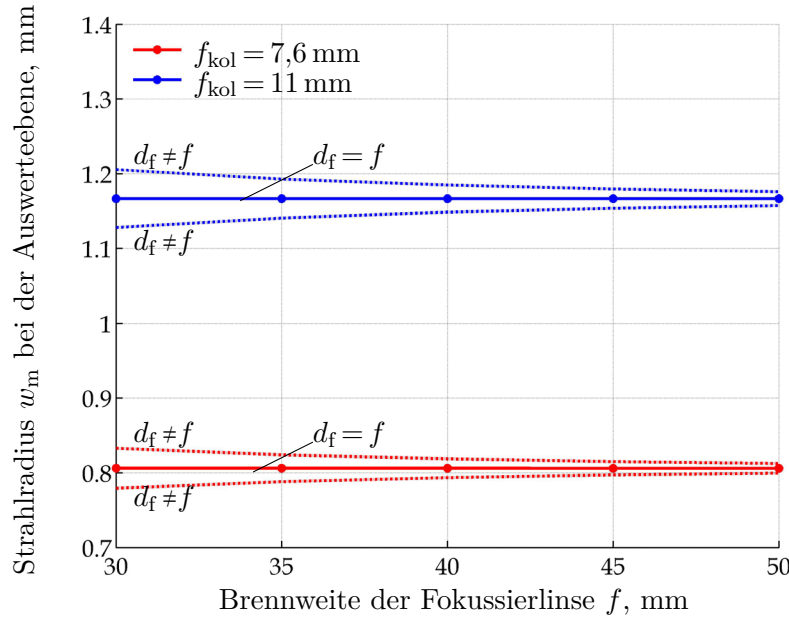


Abbildung 5.7: Strahlradius w_m bei der Auswerteebene, Einfluss von Justagefehler

des Strahldurchmesser auf dem *Cantilever* verursachen. In diesem Fall gilt $d_f \neq f$ (vgl. Abbildung 5.5). Der Justagefehler wird auf $\pm 250 \mu\text{m}$ abgeschätzt. Die daraus folgende Vergrößerungen des Strahlradius in Abhängigkeit von Brennweite f_{kol} und f sind nach der Gleichung (D.2), S. 163 berechnet und in Abbildung 5.6(a) dargestellt. Die geringsten Veränderungen des Strahldurchmessers sind bei $40 \leq f \leq 45$ mm und $f_{kol} = 11$ mm festgestellt worden.

Nach dem erneuten Durchlauf der Fokussierlinse, im Falle $d_f = f$, entspricht die Strahltaille $w'_{of} \cong w'_{0kol}$. Auch ist $w_m \cong w'_{of}$, da der Abstand d zur Auswerteebene (PSD oder Fotoempfänger der interferometrischen Auswerteeinheit) aus konstruktiven Gegebenheiten nur einige cm bemisst. Somit beträgt der Strahlradius w_m bei der Auswerteebene 0,81 mm für $f_{kol} = 7,6$ mm bzw. 1,17 mm für $f_{kol} = 11$ mm. Der beschriebene Justagefehler, im Falle $d_f \neq f$, führt auch zu einer Veränderung des Strahlradius w_m bei der Auswerteebene (vgl. Abbildung 5.7). Somit liegt die berechnete Abweichung des Strahlradius w_m von w'_{0kol} nach den Gleichungen (D.2) – (D.4), S. 163 im Bereich von maximal $\pm 40 \mu\text{m}$ (bei $f = 30$ mm und $f_{kol} = 11$ mm, vgl. Abbildung 5.7). Diese Abweichung hat auf die Auswertung der interferometrischen Positionsmessung und der Erfassung der Biegung des *Cantilevers* mittels Lichtzeiger nur einen geringen Einfluss.

Der durch die Auslenkung des *Cantilevers* im *Contact*-Modus (CM) um $1 \mu\text{m}$ und bei Einsatz von Fokussierlinsen mit Brennweiten f von $30 \dots 50$ mm verursachte maximale Versatz p des von der Oberfläche des *Cantilevers* reflektierten Laserstrahls (vgl. Abbildung 5.4) beträgt nach Gleichung (5.8) $0,20 \dots 0,33$ mm. Der Parallelversatz p führt zur Verlagerung des Schwerpunktes des auf die Auswertungsebene (PSD und Fotoempfänger der interferometrischen Auswerteeinheit) fallenden kollimierten Messstrahls. Dieser Parallelversatz führt bei der interferometrischen Auswertung zu einer Verschlechterung des Interferenzsignals und wird gleichzeitig zur Ermittlung der Auslenkung des *Cantilevers* mittels PSD genutzt.

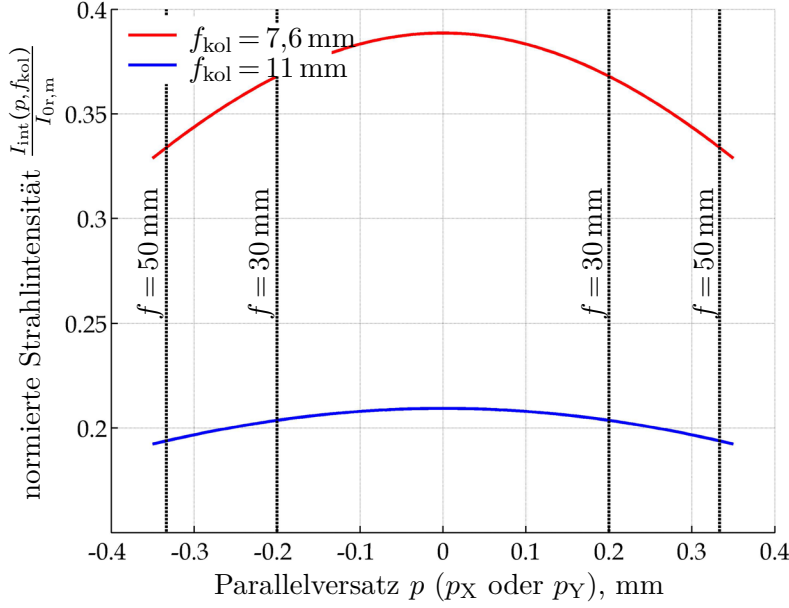


Abbildung 5.8: Abhängigkeit der normierten Strahlintensität $I_{\text{int}}(p, f_{\text{kol}})/I_{0r,m}$ vom Parallelversatz p (p_X oder p_Y) und Strahlradius w_m

Um den Zusammenhang zwischen Parallelversatz p , Radius des Messstrahls w_m und der Veränderung des Interferenzsignals zu beschreiben, soll ausgehend von Gleichung (4.2), S. 37 die Verteilung des Interferenzanteils der Intensität $\sqrt{I_r I_m}$ [73] unter Berücksichtigung der kreisförmigen Blende (vgl. Abbildung 4.9, S. 37), welche zur Erhöhung der Kippinvarianz des Interferometers eingesetzt wird [10, 12, 48], berechnet werden. Es wird angenommen, dass die Laserlichtleistung des Mess- und Referenzstrahls in der Auswertungsebene gleich ist. Der Radius des Referenzstrahls w_r kann nach Gleichung (D.2), S. 163 als Transformation der Strahltaile $w'_{0\text{kol}}$ berechnet werden. Für die existierenden konstruktiven Gegebenheiten beträgt die Differenz zwischen den berechneten w_r und $w'_{0\text{kol}}$ lediglich maximal $2\text{ }\mu\text{m}$. Somit wird für die Berechnungen angenommen: $w_r \cong w_m \cong w'_{0\text{kol}}$. Der normierte Interferenzanteil der Intensität wird, wie in [81] gezeigt, unter Berücksichtigung der Gleichung (D.1), S. 163 für unterschiedliche Parallelversätze p des Messstrahls folgend ermittelt:

$$\frac{I_{\text{int}}(x, y, p)}{I_{0r,m}} = \frac{\sqrt{I_r(x, y) I_m(x, y)}}{I_{0r,m}} = \sqrt{e^{-2 \frac{x^2+y^2}{w_{0\text{kol}}'^2}} e^{-2 \frac{(x-p_X)^2+(y-p_Y)^2}{w_{0\text{kol}}'^2}}} = e^{\frac{\sqrt{-2(x^2+y^2+(x-p_X)^2+(y-p_Y)^2)}}{w_{0\text{kol}}'}}. \quad (5.10)$$

Die resultierende normierte Strahlintensität $I_{\text{int}}(p, f_{\text{kol}})/I_{0r,m}$ nach Integration über die Kreisfläche der Auswertebende [81] mit einem Durchmesser von $0,8\text{ mm}$ wurde für unterschiedliche Parallelversätze p_X und p_Y , Strahlradien w_m und somit Brennweiten der Kollimatorlinse f_{kol} berechnet und in Abbildung 5.8 dargestellt [226]. Folge des größeren Strahlradius ($w_r \cong w_m \cong w'_{0\text{kol}} = 1,17\text{ mm}$ bzw. $f_{\text{kol}} = 11\text{ mm}$) ist eine stärkere Verringerung der Gesamtintensität des durch die Blende fallenden Mess- und Referenzstrahls und ein geringerer Intensitätsabfall in Abhängigkeit vom Parallelversatz p (vgl. Abbildung 5.8).

Der Parallelversatz p des Messstrahls im Lichtzeiger wird mittels PSD ermittelt. Ein PSD besteht aus vier einzelnen Fotodioden (vgl. Abbildung 5.9). Die Fotodioden-Segmente sind durch einen kleinen Steg ($s = 30\text{ }\mu\text{m}$ beim verwendeten PSD S5980 von der Firma Hamamatsu Photonics K.K.) voneinander getrennt. Das Funktionsprinzip des

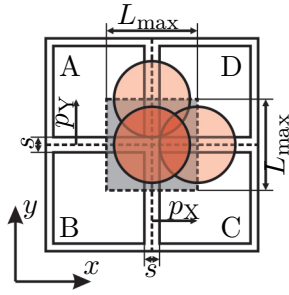


Abbildung 5.9: 2D-Messen mit PSD: L_{\max} Maximaler Messbereich, p_X und p_Y Parallelversatz in x - und y -Richtungen, s Trennstegbreite der PSD

PSD basiert auf Umwandlung des auf die Fotodioden fallendes Laserlichtes in elektrische Ströme I_A , I_B , I_C und I_D . Die Fotodiodenströme sind von der Strahlintensität abhängig. Über den Vergleich der Fotodiodenströme der einzelnen Segmente kann die Position des Strahlschwerpunktes (bzw. der Parallelversatz) p_X und p_Y bestimmt werden:

$$p_X \propto S_x = \frac{(I_C + I_D) - (I_A + I_B)}{I_A + I_B + I_C + I_D}, \quad p_Y \propto S_y = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D}. \quad (5.11)$$

Der Messbereich L_{\max} des PSD ist vom Durchmesser $2w_m$ des Strahls abhängig (vgl. Abbildung 5.9).

Für die Berechnung des Zusammenhanges zwischen den normierten Ausgangssignalen des PSD S (S_x und S_y) und dem Parallelversatz p (p_X und p_Y) des Messstrahls wurde der Gaußstrahl auf dem PSD verschoben und dessen Intensität (vgl. Gleichung (D.1), S. 163) jeweils über die einzelnen Fotodioden-Segmente A, B, C und D integriert. Und schließlich die Ausgangssignale S_x , S_y auf Basis der zuvor beschriebenen Gleichungen (5.11) ermittelt. Der Zusammenhang zwischen S und p für verschiedene Strahltaillen wird in der Abbildung 5.10(a) dargestellt. Die Verkleinerung der Strahltaille w_m bewirkt nicht nur die Erhöhung der Empfindlichkeit sondern auch die Verstärkung der Nichtlinearität der Kennlinie des Lichtzeigers (vgl. Abbildung 5.10(b)). Die Vergrößerung der Brennweite

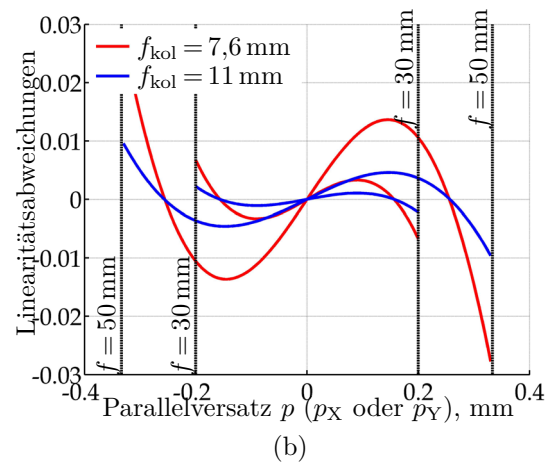
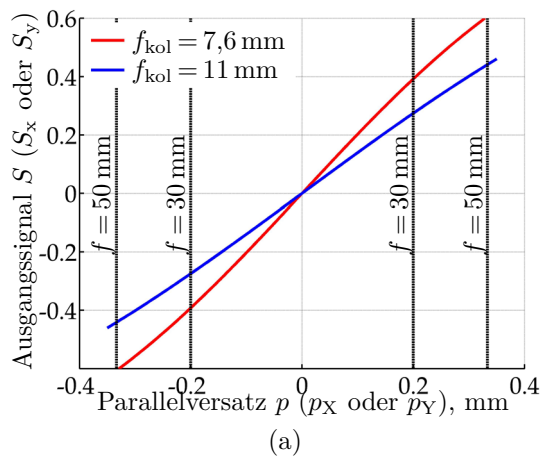


Abbildung 5.10: Theoretische Kennlinien des Ausgangssignals S (S_x oder S_y) des PSD (a) und deren Linearitätsabweichungen (b) in Abhängigkeit von den Brennweiten des Kollimators f_{kol} und der Fokussierlinse f

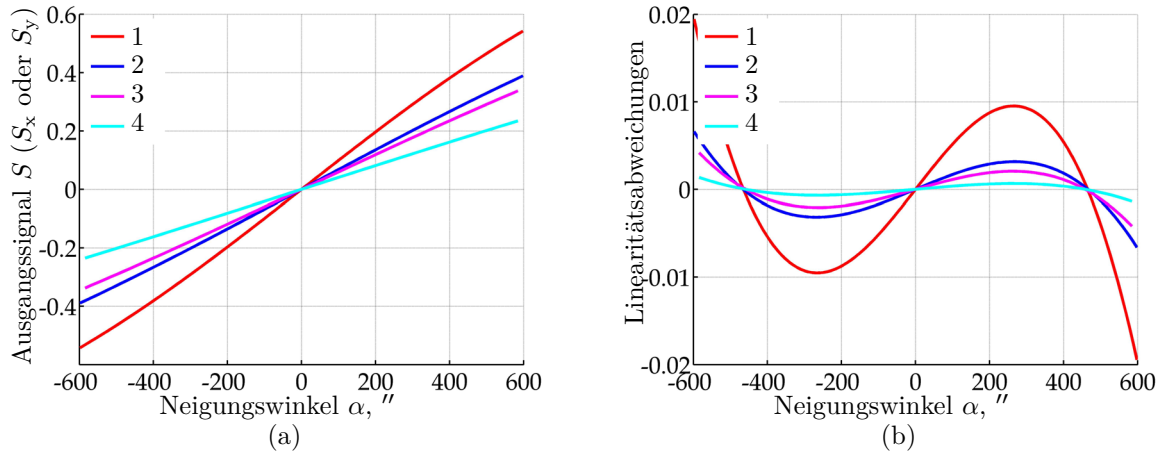


Abbildung 5.11: Theoretische Kennlinien des Ausgangssignals S (S_x oder S_y) des PSD (a) und deren Linearitätsabweichungen (b) in Abhängigkeit von dem Neigungswinkel α , den Brennweiten des Kollimators f_{kol} und der Fokussierlinse f (1 $f_{kol} = 7,6$ mm, $f = 50$ mm, 2 $f_{kol} = 11$ mm, $f = 50$ mm, 3 $f_{kol} = 7,6$ mm, $f = 30$ mm, 4 $f_{kol} = 11$ mm, $f = 30$ mm)

f der Fokussierlinse führt auch zur Empfindlichkeitserhöhung der Winkelmessung sowie zur Steigung der Nichtlinearität (vgl. Abbildung 5.11).

Die Positionsmessung des Strahlschwerpunktes auf dem PSD wurde auch experimentell untersucht. Die Messanordnung des PSD auf der Spiegelecke der NMM-1 ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Der PSD wurde während der Messung auf der Spiegelecke der NMM-1 horizontal in x - und y -Richtung bewegt und mit einem fest installierten kollimierten Laserstrahl mit der Taille $w'_{0kol} = 1,17$ mm ($f_{kol} = 11$ mm) beleuchtet. Die in Spannung umgewandelten und vorverstärkten vier Signale der Fotodioden des PSD wurden mit dem Auswertemodul (Winkelmesskarte) PSD-03, der Firma SIOS Messtechnik GmbH mit dem Spannungsbereich von ± 10 V und dem Verstärkungsfaktor 4, in die normierten Ausgangssignale S_x , S_y gewandelt (vgl. Gleichung (5.11)). Die analogen Signale S_x , S_y wurden mit dem ± 10 V 16-Bit-A/D-Wandlern der DSP-Einheit der NMM-1 erfasst.

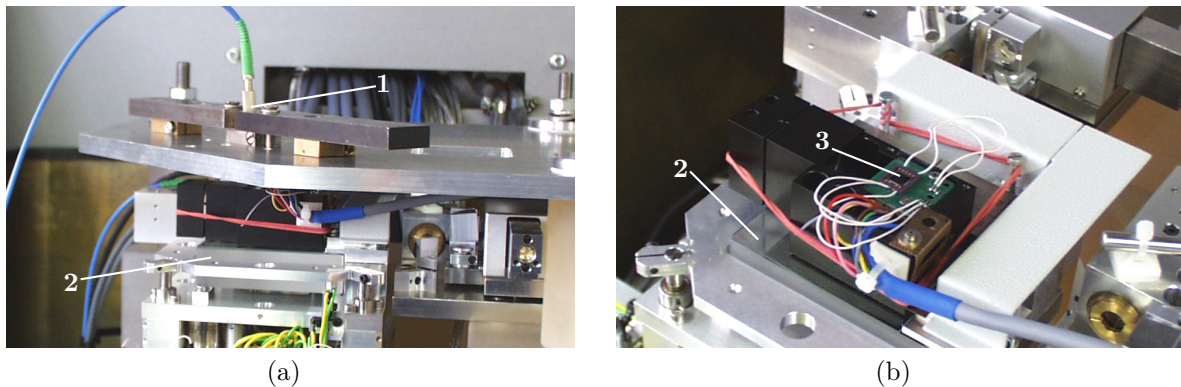


Abbildung 5.12: Messanordnung in der NMM-1 für die experimentelle Untersuchung des PSD (1 LWL mit dem Kollimator, 2 Spiegelecke der NMM-1, 3 PSD)

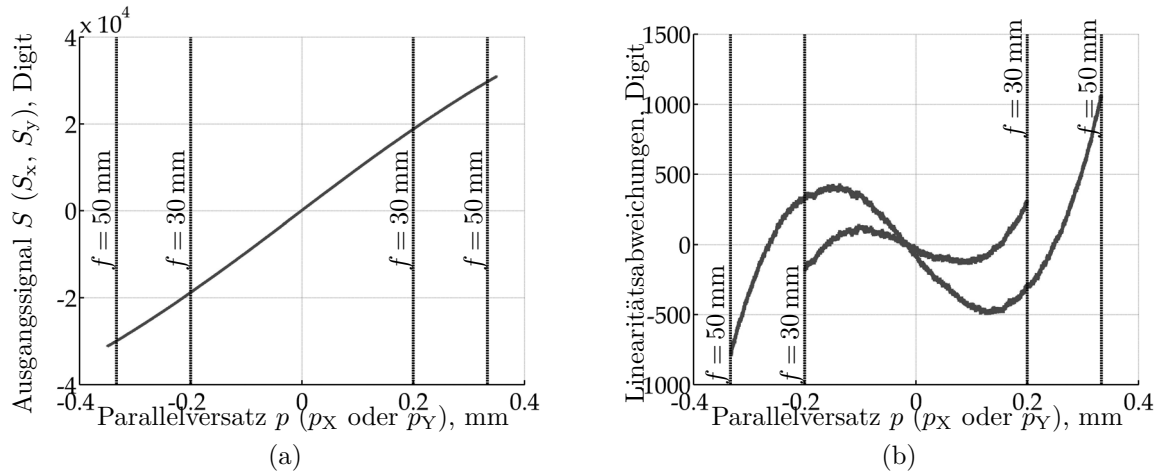


Abbildung 5.13: Aufgezeichnete Kennlinie des Ausgangssignals des PSD S (S_x oder S_y) (a) und deren Linearitätsabweichungen (b)

In Abbildung 5.13 sind die gemessene Kennlinie und deren Linearitätsabweichungen dargestellt. Die A/D-Wandlerwerte entsprechen den Ausgangssignalen S_x und S_y . Aus der Kennlinie ergibt sich für die Positionsmessung des Strahlschwerpunktes ein linearer Anstieg von ca. 10,9 nm/Digit. Die Wiederholbarkeit des Anstieges der Kennlinie, bestimmt über mehrere Messungen, beträgt 0,01 nm/Digit. Ausgehend vom linearen Anstieg der Kennlinie des PSD wurden die theoretische Auflösung der Winkelmessung und Auslenkungsmessung des Lichtzeigers bei unterschiedlichen Brennweiten der Fokussierlinse f entsprechend der Gleichungen (5.8) und (5.7) ermittelt und in der Tabelle 5.1 zusammengefasst. Ausgehend von der Tabelle 5.1 und der Abbildung 5.10(a), S. 47 werden die Anforderungen an Empfindlichkeit, Auflösung und Messbereich des Lichtzeigers bei allen untersuchten Linsenbrennweiten f und f_{kol} erfüllt.

Die Vergrößerung der Brennweite f der Fokussierlinse ermöglicht eine höhere Empfindlichkeit der Winkelmessung bzw. der Messung der Auslenkung des *Cantilevers*. Allerdings vergrößert sich der Parallelversatz p (vgl. Gleichung (5.8)) und demzufolge die Nichtlinearität der Kennlinie des Ausgangssignals S des PSD (vgl. Abbildungen 5.10 und 5.13). Auch der Abfall der normierten Strahlintensität $I_{\text{int}}(p, f_{\text{kol}})/I_{0r,m}$ bei der interferometrischen Auswerteeinheit (vgl. Abbildung 5.8, S. 46) nimmt zu. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die Fokussierlinse mit einer Brennweite von $f = 40$ mm ausgewählt. Der Einsatz der kürzeren Brennweiten f erschwert auch die Integration der Sondaufnahme (vgl. Abschnitt 6.2, S. 58). In Bezug auf die Kollimatorlinse sind beide Brennweiten f_{kol} für den

Brennweite der Fokussierlinse f	Winkelmessung	Auslenkungsmessung des CM <i>Cantilevers</i>
30 mm	0,04''	0,05 nm
40 mm	0,028''	0,04 nm
50 mm	0,022''	0,03 nm

Tabelle 5.1: Theoretische Auflösung

Einsatz im Sondenmesssystem geeignet. Ausgehend von den Abbildungen 5.6(a), S. 44 und 5.10(b), S. 47 wurde der Kollimator mit der Brennweite von $f_{\text{kol}} = 11 \text{ mm}$ ausgewählt. Die unterschiedlichen Varianten der optischen Anordnung des Interferometers und des Lichtzeigers in einem Sondenmesssystem werden im nächsten Abschnitt 5.3 beschrieben.

5.3 Optische Anordnung

Entsprechend des dargestellten Konzeptes der gleichzeitigen Erfassung von Position und Winkellage (Biegung und Torsion) des *Cantilevers* (vgl. Abschnitt 5.1) mittels eines Planspiegelinterferometers (vgl. Abschnitt 4.3.2) und eines Lichtzeigers (vgl. Abschnitt 4.3.1) mit den im Abschnitt 5.2 ausgewählten Komponenten wurden verschiedene optische Anordnungen des interferometrischen Sondenmesssystem entwickelt, aufgebaut und untersucht. Die erste Anordnung (Variante 1) ist in Abbildung 5.14 zu sehen. Das Optikschemata stellt eine Erweiterung des im Abschnitt 4.3.2, S. 36 beschriebenen Planspiegelinterferometers dar. Zwischen dem polarisierenden Strahlteiler (PT) (4) und der $\lambda/4$ -Platte (10) wurde ein neutraler Strahlteiler (NT) (9) eingesetzt. Der linearpolarisierte Mess- und Referenzstrahl wird teilweise zur Blende (11) und der optoelektronischen Einheit zur Auswertung des

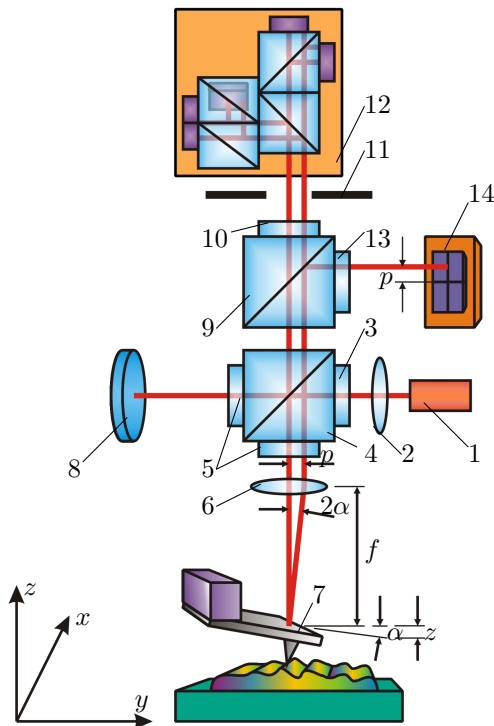
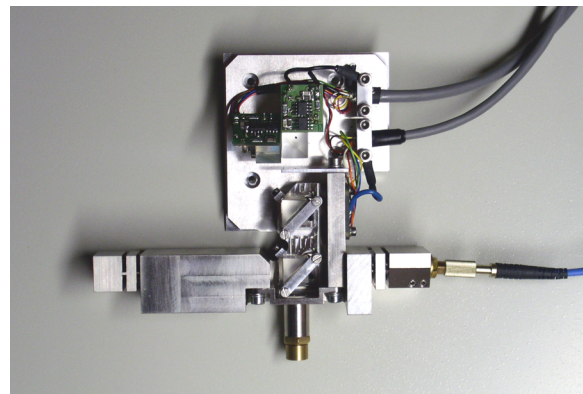
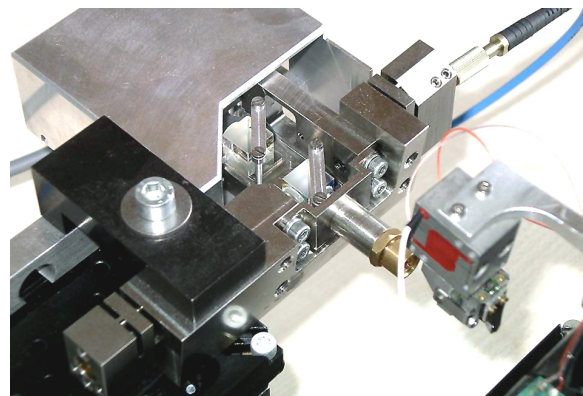


Abbildung 5.14: Optische Anordnung, Variante 1 (1 LWL, 2 Kollimatorlinse, 3 und 13 Polarisationsfilter (PF), 4 PT, 5 und 10 $\lambda/4$ -Platte, 6 Fokussierlinse, 7 *Cantilever*, 8 Referenzspiegel, 9 NT, 11 Blende, 12 Auswerteeinheit, 14 PSD)



(a)



(b)

Abbildung 5.15: Sondenmesssystem mit optischer Anordnung nach Variante 1

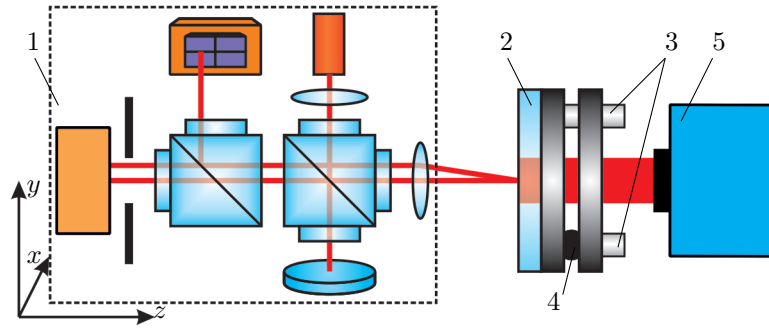


Abbildung 5.16: Messanordnung zur Ermittlung der Kennlinie des Lichtzeigers (1 Sondenmesssystem, 2 Planspiegelplatte, 3 Aktor, 4 Kugel, 5 Autokollimator)

Interferenzbildes (12) geleitet, wobei beide Teilstrahlen eine $\lambda/4$ -Platte (10) passieren. Der andere Teil des linearpolarisierten Mess- und Referenzstrahls wird zu Quadrantenfotodioden bzw. positionsempfindlichen Detektor (PSD) (14) gelenkt. Dabei wird durch ein Einsatz des Polarisationsfilters (PF) (13) nur der Messstrahl durchgelassen. Das nach dieser Anordnung aufgebaute Sondenmesssystem ist in der Abbildung 5.15(a) dargestellt.

Das Sondenmesssystem wurde an *Cantilevern* getestet (vgl. Abbildung 5.15(b)) und seine Funktion konnte dabei nachgewiesen werden. Daran schlossen sich die Untersuchungen zur Ermittlung der Kennlinien des Lichtzeigers an. Es wurde ein ähnlicher wie in [81] vorgeschlagener und beschriebener Aufbau benutzt (vgl. Abbildung 5.16). Als Referenzgerät wurde ein elektronischer Autokollimator ELCOMAT HR der Firma MÖLLER-WEDEL OPTICAL GmbH (5) eingesetzt. Der Messstrahl des Sondenmesssystems (1) wurde auf der Planspiegelplatte (2) fokussiert. Die Planspiegelplatte (2) wurde mittels piezoelektrischen Aktoren (3) schrittweise um eine Achse gekippt. Die einzelne Signale der Fotodioden-Segmente A, B, C, D des PSD zusammen mit dem Wegsignal des Interferometers wurden mittels eines Multifunktions-Datenerfassungsmodul NI DAQPad-6020E der Firma *National Instruments Corporation* aufgenommen. Gleichzeitig wurden auch die Winkelwerte mittels Autokollimator aufgezeichnet. In Abbildung 5.17(a) ist die Kennlinie des Ausgangssignals S_y in Abhängigkeit von den Winkelwerten $\alpha_{y,AKF}$ zu sehen. Den Zusammenhang zwischen Kippwinkel $\alpha_{y,AKF}$ der Planspiegelplatte und Parallelversatz p_y beschreibt Gleichung (5.8).

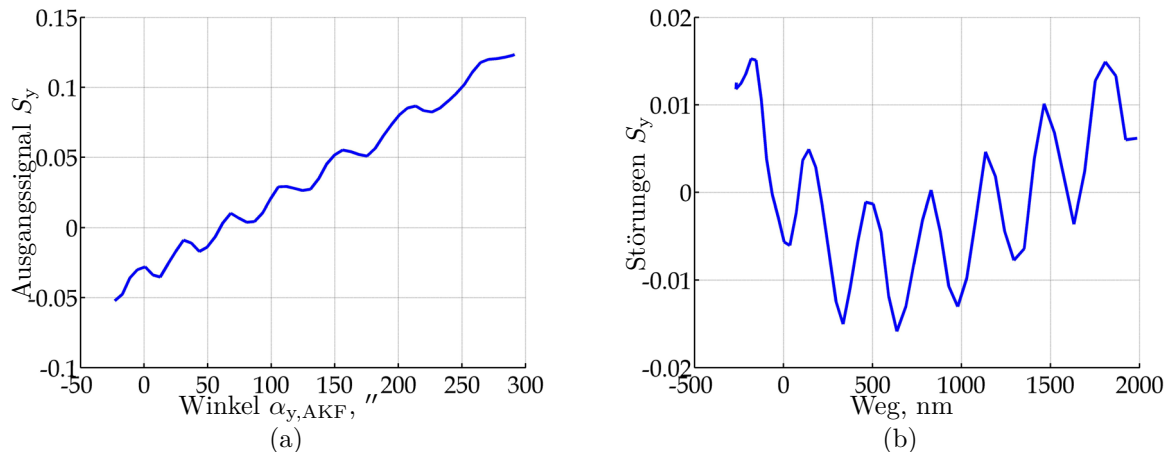


Abbildung 5.17: Aufgezeichnete Kennlinie des Ausgangssignals S_y des PSD (a) und deren wegabhängige Störungen (b)

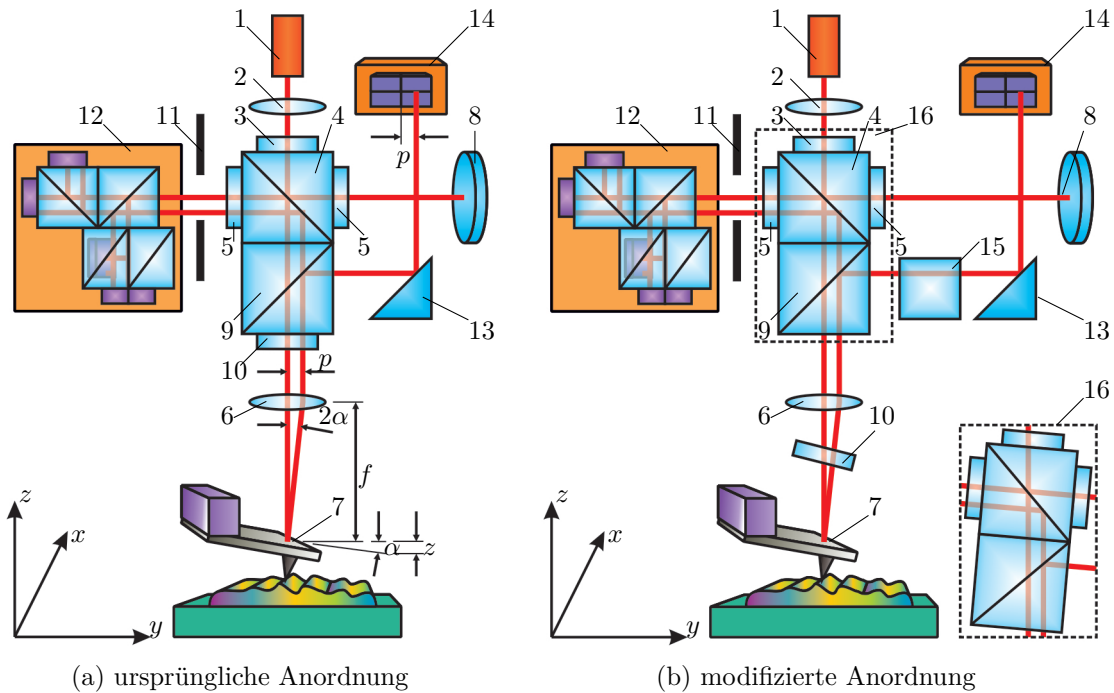


Abbildung 5.18: Optische Anordnung, Variante 2 (1 LWL, 2 Kollimatorlinse, 3 PF, 4 und 15 PT, 5 und 10 $\lambda/4$ -Platte, 6 Fokussierlinse, 7 *Cantilever*, 8 Referenzspiegel, 9 NT, 11 Blende, 12 Auswerteeinheit, 13 Umlenkspiegel, 14 PSD, 16 Teilerwürfelgruppe)

Bei diesen Messungen wurden signifikante Störungen festgestellt (vgl. Abbildung 5.17(b)). Eine Untersuchung zur Ursache zeigte, dass diese Störsignale zyklisch von der Position des Messspiegels abhängig sind. Dabei beträgt die Signalperiode ca. $\lambda/2$ (vgl. Abbildung 5.17(b)). Dies deutete auf Störinterferenzen hin. Eine genauere experimentelle und theoretische Untersuchung des interferometrischen Sondenmesssystems (vgl. Abbildung 5.14) ergab, dass diese durch die unzureichenden polarisationsoptischen Eigenschaften des PT (4) und der $\lambda/4$ -Platten (5), sowie von Reflexionen von optischen Oberflächen (unzureichende Antireflexbeschichtung) insbesondere der Fokussierlinse (6) hervorgerufen wurden. Zur Bestimmung des Polarisationszustandes des Messstrahls nach dem Passieren der optischen Elemente des Sondenmesssystems und zum Überprüfen der Polarisationsseigenschaften und Einstellung der $\lambda/4$ -Platte (5) wurde ein Polarisationsanalysator RPA2000 der Firma Instrument Systems GmbH eingesetzt. Untersuchungen zeigten, dass die Elliptizität des zirkularpolarisierten Messstrahls zwischen der Fokussierlinse (6) und der Sonde (7) 44° und des linearpolarisierten Messstrahls vor dem PSD (14) $0,1^\circ$ betragen.

Die Störinterferenzen konnten nicht durch die Auswahl der optischen Bauteile, Austausch des PF (13) durch PT, Einsatz des He-Ne-Lasers mit einem Faradayisolator oder eine veränderte Justierung des Sondenmesssystems ausreichend minimiert werden. Dies führte zu einem neuen Entwurf der optischen Anordnung des Sondenmesssystems (vgl. Abbildung 5.18).

In der neuen optischen Anordnung (Variante 2) wurde anstelle einer polarisationsoptischen Strahlteilung für die interferometrische und die positionsempfindliche Auswertung eine polarisationsneutrale Amplitudenteilung benutzt (vgl. Abbildung 5.18). Dafür musste

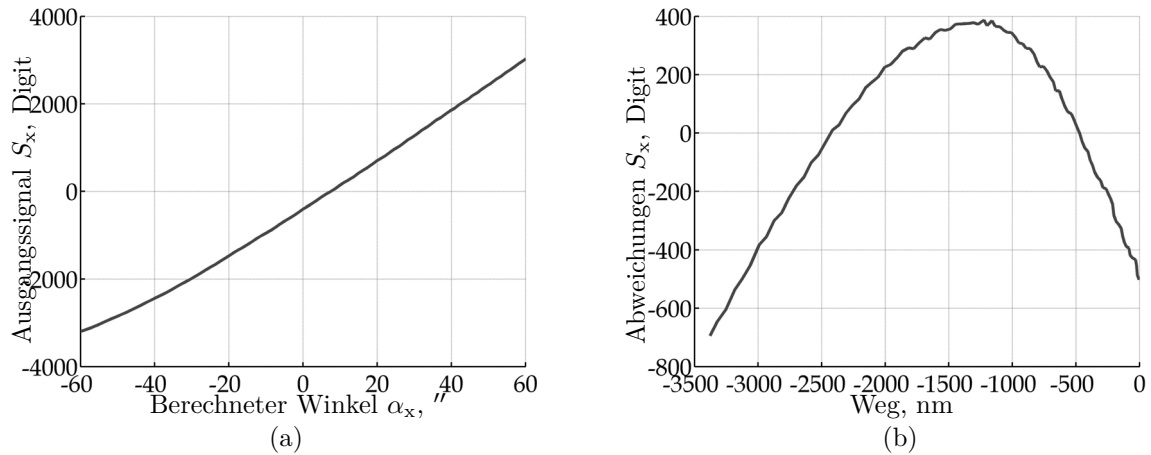


Abbildung 5.19: Aufgezeichnete Kennlinie des Ausgangssignals des PSD S_x (a) und deren Wegabhängige Störungen (b)

der NT (9) in den Messarm integriert werden (vgl. Abbildung 5.18(a)). Die Hälfte des von der Sonde (7) reflektierten Lichtes wird von diesem NT (9) direkt zum PSD (14) geleitet [51]. Mit dieser Anordnung konnte das Problem der Störinterferenzen ebenfalls nicht vollständig gelöst werden.

In einer weiteren Anordnung mit dem außermittigen Strahldurchgang durch die Fokussierlinse und somit der geometrischen Trennung von hin- und rückgehendem Messstrahl [8, 81] traten die Störinterferenzen ebenfalls auf. Durch verschiedene experimentelle Untersuchungen ist es gelungen, die Hauptursache für die Störungen festzustellen. Die Störinterferenzen entstehen durch die Spiegelung (Reflexion) von den Oberflächen der $\lambda/4$ -Platte (10) und der Fokussierlinse (6). Trotz Antireflexbeschichtung der Oberfläche der $\lambda/4$ -Platte (10) wurden ca. 2–3% Reflexionen gemessen. Um die Störinterferenzen auf dem PSD (14) zu beseitigen, sollen die Störreflexe unterdrückt werden. Allerdings ist die Anpassung der Antireflexbeschichtung sehr kostspielig.

Eine weitere Möglichkeit ist die geometrische Trennung der Störreflexionen vom zum PSD (14) gelenkten Messstrahl, so dass diese nicht miteinander interferieren können. Es wurden somit folgende Maßnahmen ergriffen (vgl. Abbildung 5.18(b)):

- Anordnung eines PT (15) zwischen NT (9) und Umlenkspiegel (13) zur Unterdrückung der Störreflexionen im zum PSD (14) gelenkten Strahl.
- Schräge Anordnung der $\lambda/4$ -Platte (10) zwischen der Fokussierlinse (6) und Sonde (7).
- Drehung der Teilerwürfelgruppe (16) um einen kleinen Winkel $< 5^\circ$.

Die gemessene Kennlinie des Ausgangssignals S_x des PSD des neuen modifizierten Sondenmesssystem (Variante 2, Abbildung 5.18(b)) ist in der Abbildung 5.19(a) dargestellt. Für die Untersuchungen wurde ein S-311.10 Piezo Hub- und Kippscanner mit einem Kippwinkel von $600 \mu\text{rad}$ der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG verwendet. Der Messspiegel wurde mittels Piezoscanner schrittweise gekippt und gleich-

zeitig die Ausgangssignale S_x und S_y des PSD sowie beide sin- und cos-Signale S_{\sin} und S_{\cos} des Interferometers aufgezeichnet. Die Stellspannungen des Piezoscanners wurden entsprechend in die Kippwinkel α_x und α_y umgerechnet. Zur Überprüfung der Störinterferenzunterdrückung wurden die Abweichungen des Ausgangssignals S_x des PSD von der Geraden in der Abhängigkeit von den demodulierten Längenmesswerte betrachtet (vgl. Abbildung 5.19(b)). Die Störinterferenzen sind nicht mehr deutlich erkennbar.

Somit wurde das Sondenmesssystem des LiAFM auf der Grundlage dieser modifizierten Anordnung (Variante 2) entworfen. Im nachfolgenden Kapitel 6 wird der Aufbau des LiAFM erläutert.

6 Aufbau des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM)

Die Grundkomponenten des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM) sind das Sondenmesssystem, die Sondaufnahme und das Kamerasystem. Nachfolgend werden mechanischer Aufbau und Justage des Sondenmesssystems, Anforderungen an die Sondaufnahme und deren Design sowie die Anordnung des Mikroskopkamerasystems dargestellt.

6.1 Aufbau und Justage des Sondenmesssystems

Auf Grundlage der optischen Anordnung des interferometrischen Sondenmesssystems (vgl. Abbildung 5.18(b), S. 52) wurde ein mechanischer Aufbau realisiert. Alle Komponenten des Sondenmesssystems sind auf einem gemeinsamen monolithischen Grundkörper (6) mit hoher Steifigkeit befestigt (vgl. Abbildung 6.1). Zur Reduzierung der Temperaturabhängigkeit des Messsystems wurde der Grundkörper aus einer ausdehnungsarmen Eisen-Nickel-Legierung: Invar 36[®] (Wärmeausdehnungskoeffizient: $1,3 \times 10^{-6} \text{ m/K}$ [32]) gefertigt. Die zentrale Komponente des Sondenmesssystems ist die Teilerwürfelgruppe (5). Sie besteht aus einem polarisierenden Strahlteiler (PT), einem Polarisationsfilter (PF), zwei $\lambda/4$ -Platten und einem neutralen Strahlteiler (NT), die miteinander verkittet sind (vgl. Abbildung 5.18(b), S. 52). Durch die Ausrichtung des PF ist die Teilung 1 zu 4 realisiert, so dass 20 % des Laserlichtes in den Referenzarm reflektiert und 80 % durchgelassen wird. Durch

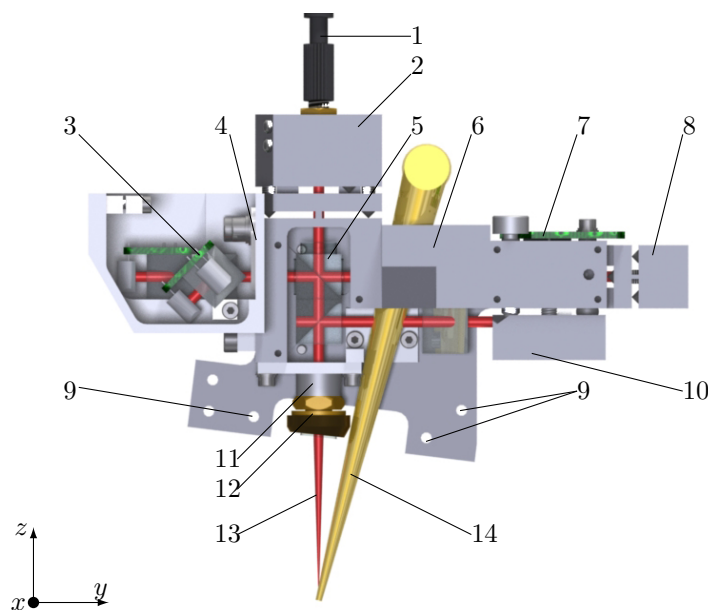


Abbildung 6.1: Aufbau des Sondenmesssystems
(1 LWL, 2 Halterung und Justagevorrichtung des Kollimators in Form eines Einkörpergelenkes, 3 Auswerteeinheit, 4 Blende, 5 Teilerwürfelgruppe, 6 Grundkörper, 7 PSD, 8 Halterung und Justagevorrichtung des Referenzspiegels in Form eines Einkörpergelenkes, 9 Befestigung der Sondaufnahme, 10 Justagevorrichtung des PSD, 11 Tubushalter, 12 Fassung mit der Fokussierlinse, 13 Messstrahl, 14 Sichtfeld der Kamera)

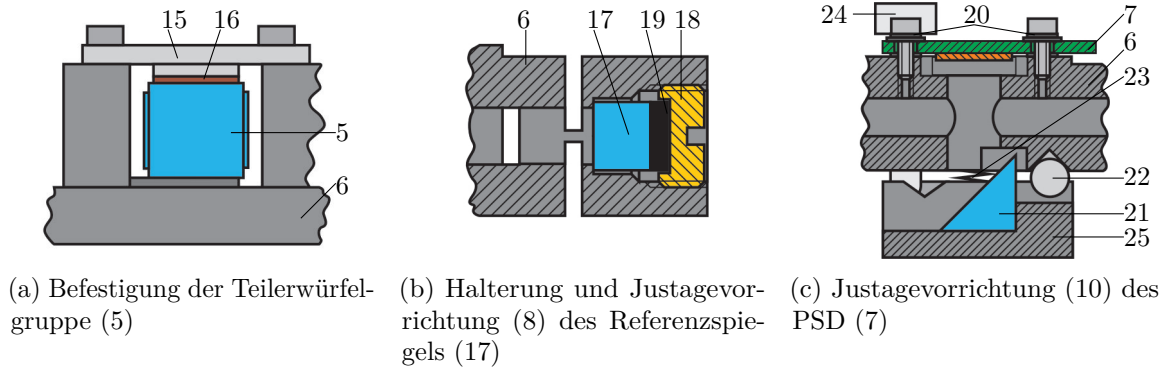


Abbildung 6.2: Prinzip der Befestigung der Komponenten des Sondenmesssystems (5 Teilerwürfelgruppe, 6 Grundkörper, 7 PSD, 15 Deckel, 16 Korkzwischenlage, 17 Referenzspiegel, 18 spezieller Gewindestift, 19 Elastomer, 20 Schrauben, 21 Umlenkprisma, 22 Kugel, 23 Zugfeder, 24 Einstellschraube, 25 Halter)

die Teilung bleibt die Intensität des Mess- und Referenzstrahls vor der Auswerteeinheit in etwa gleich. Die Befestigung der Teilerwürfelgruppe (5) am Grundkörper (6) erfolgt durch Klemmen. Um mechanische Spannungen in der Teilerschicht des PT zu vermeiden, wurde die Teilerwürfelgruppe (5) an einem Teilprisma des PT vertikal mithilfe eines Deckels (15) und einer elastischen Korkzwischenlage (16) fixiert (vgl. Abbildung 6.2(a)).

Die Befestigung des polarisationserhaltenden Monomode-LWL (1) mit eingestellter Kollimatorlinse erfolgt durch seitliche Klemmung mittels Gewindestiften in einem Einkörpergelenk (2) des Grundkörpers (6) (vgl. Abbildung 6.1). Das Kippgelenk (2) dient zur Ausrichtung des kollimierten Laserstrahls. Der Referenzspiegel (17) ist vorderseitig in einem Einkörpergelenk (8) des Referenzarms des Grundkörpers (6) mittels eines speziellen Gewindestiftes (18) und eines Elastomers (19) fixiert (vgl. Abbildung 6.2(b)). Diese Befestigung des Referenzspiegels (17) wurde von den Interferometern der NMM-1 [81, 189] übernommen. Das Kippgelenk (8) dient zur Ausrichtung des Referenzspiegels (17). Dabei ist der Abstand zum Referenzspiegel so ausgewählt, dass die geometrische Strecken in Mess- und Referenzarm gleich lang sind (vgl. Abbildung 6.1). Die Länge des Messarms wurde so festgelegt, dass sich der Messpunkt des LiAFM im eingebauten Zustand im Schnittpunkt der drei Interferometerstrahlen der NMM-1 befindet.

Die Blende (4) und die Auswerteeinheit (3) werden seitlich am Grundkörper (6) fixiert (vgl. Abbildung 6.1). Als Fokussierlinse wird ein Achromat mit einer Brennweite von $f = 40 \text{ mm}$ verwendet. Die Fassung mit der Fokussierlinse (12) wird in ein Tubushalter (11) eingeschraubt. Der Tubushalter (11) mit der Linse wird seitlich am Grundkörper (6) befestigt, was die axiale und laterale Justierung der Linse ermöglicht (vgl. Abbildung 6.1). Die PSD-Platine (7) ist mit zwei symmetrisch angeordneten Schrauben (20) am Grundkörper (6) festgeschraubt (vgl. Abbildung 6.2(c)). Das Prisma (21) zur Umlenkung des Messstrahls zum PSD wird in einem Halter (25) befestigt und mittels V-Nut-Kugel-Paarung (22), zwei Zugfedern (23) und zwei Einstellschrauben (24) mit dem Grundkörper (6) verbunden. Zur Unterdrückung von Störreflexen im Sondenmesssystem werden alle relevanten Seitenwände mit mattschwarzem Kameralack beschichtet. Der Grundkörper (6) verfügt weiterhin über

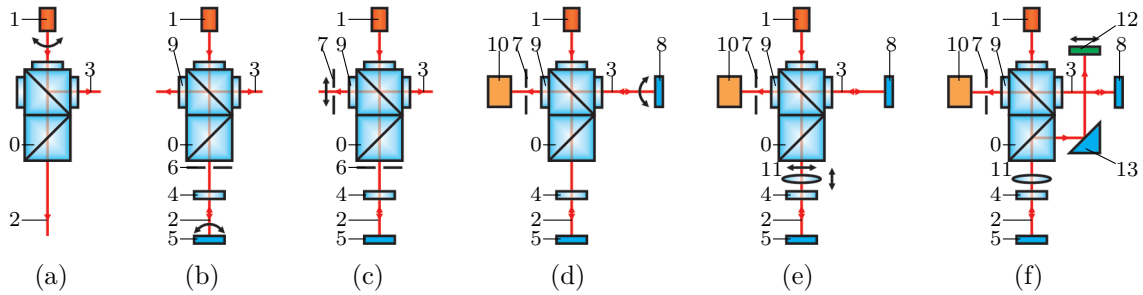


Abbildung 6.3: Justage des Sondenmesssystems: (a) Winkelausrichtung des kollimierten Laserstrahls, (b) Winkelausrichtung des Justierspiegels, (c) laterale Ausrichtung der Auswertblende, (d) Winkelausrichtung des Referenzspiegels, (e) laterale Ausrichtung der Fokussierlinse und (f) laterale Ausrichtung des PSD

(0 Teilerwürfelgruppe, 1 Kippgelenk mit Kollimator, 2 Messstrahl, 3 Referenzstrahl, 4 $\lambda/4$ -Platte, 5 Mess- bzw. Justierspiegel, 6 Justierblende, 7 Auswertblende, 8 Referenzspiegel, 9 $\lambda/4$ -Platte, 10 Auswerteeinheit, 11 Fokussierlinse, 12 PSD, 13 Umlenkprisma)

Befestigungsbohrungen für die Sondaufnahme (9), das Mikroskopkamarasystem und den prismatischen Führungskörper für die mechanische Einbindung in die NMM-1.

Während des Zusammenbaus des Sondenmesssystems wird als erstes die Ausrichtung der Polarisation des kollimierten Laserstrahls zum PF eingestellt. Diese Einstellung erfolgt mit einem optischen Leistungsmesser durch Suche des Intensitätsmaximums des Laserstrahls in Mess- und Referenzarm. Danach wird am Kippgelenk (1) die Ausrichtung (Winkellage) des Mess- (2) und Referenzstrahls (3) zum Grundkörper justiert (vgl. Abbildung 6.3(a)). Der nächste Schritt ist der (temporäre) Einbau und die Ausrichtung der $\lambda/4$ -Platte (4) im Messarm. Dann wird ein Mess- bzw. Justierspiegel (5) in einem großen Abstand zur Teilerwürfelgruppe (0) so justiert, dass der hin- und rücklaufende Messstrahl mittig eine Justierblende (6) passiert (vgl. Abbildung 6.3(b)). Die Auswertblende (7) wird so eingestellt, dass der Messstrahl diese mittig passiert (vgl. Abbildung 6.3(c)). Diese Justageschritte können auch mit Hilfe eines Leistungsmessers erfolgen. Danach wird am Kippgelenk die Ausrichtung des Referenzspiegels (8) so justiert, dass die reflektierten Mess- (2) und Referenzstrahlen (3) hinter der $\lambda/4$ -Platte (9) fluchten (vgl. Abbildung 6.3(d)). Die Flucht wird in einem großen Abstand geprüft. Die zentrische Einstellung der Auswertblende (7) wird mittels Leistungsmesser durchgeführt. Die nachfolgende Justage der Auswerteeinheit (10) erfolgt nach dem Prinzip der Maximierung der Interferenzsignale. Als nächstes folgt der Einbau und die Justierung der Fokussierlinse (11) (vgl. Abbildung 6.3(e)). Dafür wird der Messspiegel (5) zuerst in konstruktiv vorgegebenem Abstand zur Teilerwürfelgruppe (0) platziert und so justiert, dass das Interferenzsignal maximal ist. Nachfolgend wird die Linse (11) axial justiert so dass sich der Messspiegel (5) in der Brennebene befindet. Die Maximierung des Interferenzsignals erfolgt durch laterale Verschiebung des Tubushalters mit der Linse (11). Schließlich wird die schräge Fassung mit der $\lambda/4$ -Platte (4) auf die Fassung mit der Linse (11) aufgeklebt, wobei die vorher eingestellte Ausrichtung der $\lambda/4$ -Platte (4) unverändert bleibt. Bei Bedarf kann der Messspiegel (5) nachjustiert werden. Die maximal erreichte Signalqualität beträgt 84 %. Abschließend wird der Nullpunkt des

PSD (12) lateral ausgerichtet, während der justierbare Halter mit dem Umlenkprisma (13) in der mittleren Lage bleibt (vgl. Abbildung 6.3(f)). Zur Unterdrückung der Störsignale wird ein PT zwischen dem NT und Prisma angebracht.

6.2 Sondenaufnahme

Ein wesentlicher Bestandteil des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM) ist die Sondenaufnahme. Die Sondenaufnahme ist ein Halterungs- und Justageelement zur Aufnahme des *Cantilevers* [51]. Aufgrund der Komplexität des Sondenmesssystems ist die laterale Ausrichtung des Laserstrahls auf dem freien Ende der Sonde und die Justage der Winkellage des Interferometers zum *Cantilever* (nach dem Prinzip der Maximierung der Interferenzsignale) nicht sinnvoll. Somit muss die Sonde (z. B. nach einem Wechsel) in den Brennpunkt des Messstrahls des Sondenmesssystems justiert werden. Für die Justage sind mindestens 4 Freiheitsgrade erforderlich. Neben der translatorischen Ausrichtung (2 Freiheitsgrade) in x - und y -Richtung ist eine rotatorische Justage zur Optimierung des Interferometersignals um die x - und y -Achse (2 Freiheitsgrade) notwendig.

Die Sondenaufnahme soll den unkomplizierten Wechsel des *Cantilevers* (ohne das LiAFM aus der NMM-1 auszubauen) erlauben, die Arbeit in dynamischen Betriebsarten (durch Integration des Shaker-Piezos) ermöglichen und einen Piezoaktor für schnelle Bewegungen des *Cantilevers* in z -Richtung beinhalten.

Im ersten Testaufbau (vgl. Abbildung 6.4) wurde ein Piezoelement mit Parallelogramm-design, 8 μm Hub und einer Resonanzfrequenz von 3 kHz vorgesehen. Eine Untersuchung dieses Testaufbaus ergab jedoch, dass durch die zusätzliche Masse des *Cantilever*-Trägers die Resonanzfrequenz des Piezos erheblich reduziert wurde. Die Resonanzfrequenz lag bei ca. 378 Hz. Da dies für bestimmte Anwendungen nicht ausreichend war, wurde ein anderes System mit einem steiferen und hochfrequenten Piezoelement entwickelt.

In der neuen verbesserter Sondenaufnahme (vgl. Abbildung 6.5) wurde ein hochdynamischer piezoelektrischer Antrieb S-303.0LI der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG mit einer runden Öffnung statt des Piezoelementes mit Parallelogrammdesign

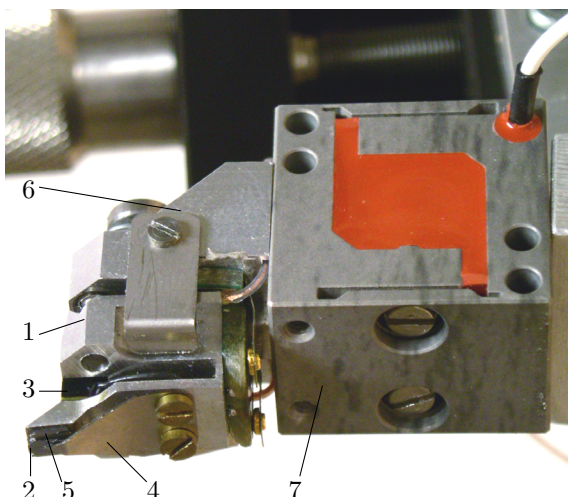


Abbildung 6.4: Testaufbau der Sondenaufnahme (1 *Cantilever*-Träger, 2 *Cantilever*, 3 Shaker-Piezo, 4 Feder, 5 *Alignment Chip*, 6 Halterung- und Justiervorrichtung, 7 Piezoelement)

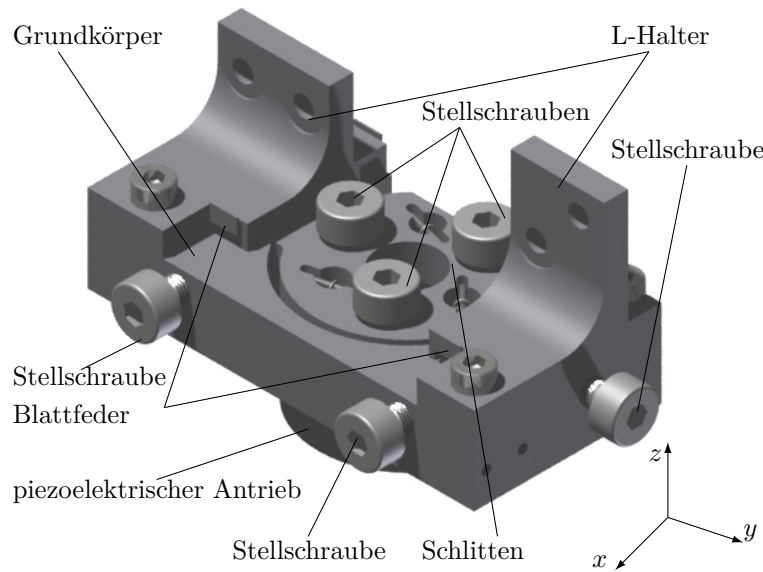


Abbildung 6.5: Modifizierte Sondenaufnahme. Justiervorrichtung zur rotatorischen und translatorischen Ausrichtung der Sonde

integriert. Der *Cantilever*-Träger und die Halterungselemente zu dessen Aufnahme wurden überarbeitet. Die Justiervorrichtung zur rotatorischen und translatorischen Ausrichtung der Sonde wurde oberhalb des piezoelektrischen Antriebes angeordnet (vgl. Abbildung 6.5). Sie besteht aus zwei gestapelten Justiereinheiten (vgl. Abbildung 6.6). Die obere Einheit war ursprünglich am Sondenmesssystem mit Hilfe von zwei L-Haltern befestigt (vgl. Abbildung 6.7(a)), um einen besseren Zugang zu den Stellschrauben zu gewähren. Es wurde eine Frequenzganguntersuchung an dem LiAFM inklusive der Sondenaufnahme durchgeführt (vgl. Abbildung 6.7). Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens des LiAFM wurde die Konstruktion der Halterungselemente der Sondenaufnahme optimiert. Die Halter wurden als steife Bauteile in Dreiecksform (Δ -Halter) ausgeführt (vgl. Abbildung 6.7(b)). Dadurch wurde die Koppelstelle zwischen dem Sondenmesssystem und der Sondenaufnahme versteift. Eine erneute Messung der Schwingbeschleunigung an der Sondenaufnahme mit einem Sensor der Firma Kistler Instrumente GmbH ergab das in Abbildung 6.8 dargestellte Leistungsspektrum. Aus dem gemessenen Leistungsspektrum der Baugruppe mit Δ -Halter erkennt man, dass die niedrigen Frequenzen gedämpft werden und die Resonanzfrequenz des Aufbaus erhöht wird.

Die obere Justiereinheit wurde in Form einer Planarführung mit manuellem Antrieb mittels Feingewindeschrauben (Stellschrauben (1)) realisiert (vgl. Abbildung 6.6(a)). Mit den im Grundkörper (2) geführten Stellschrauben (1) wird der Schlitten (3) verschoben, wobei die Druckfedern (4) die Gegenkräfte ausüben. Mit der Kraft der Federn (4) wird der Schlitten (3) zurückgeschoben, wenn die Schrauben (1) zurückgedreht werden. Zwei Stellschrauben sind parallel zur x -Achse und eine parallel zur y -Achse angeordnet. Dadurch ist die Justage in zwei translatorischen Richtungen parallel zur x - und y -Achse und eine rotatorische Ausrichtung um die z -Achse (3 Freiheitsgrade) möglich. Um ein Spiel zwischen dem Schlitten (3) und dem Grundkörper (2) zu vermeiden, wird der Schlitten gegen den Grundkörper vorgespannt. Die Vorspannung wird durch die zwischen den Halterungselementen und dem Schlitten eingebauten Blattfedern erreicht (vgl. Abbildung 6.5).

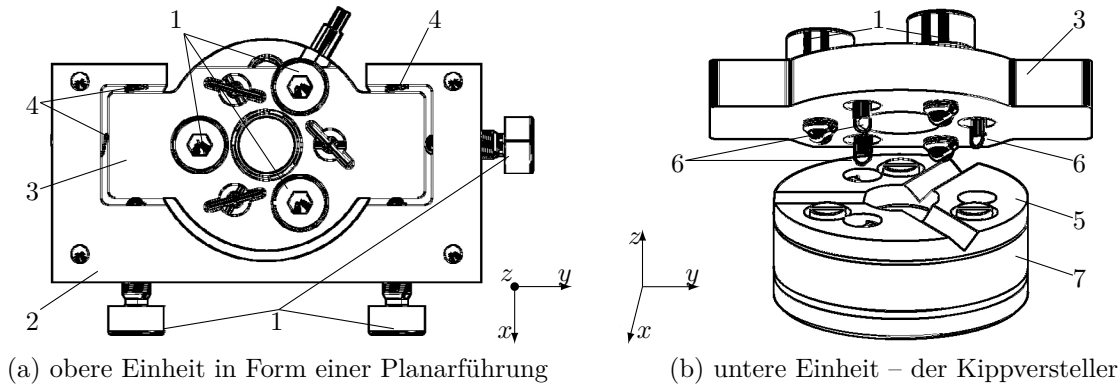
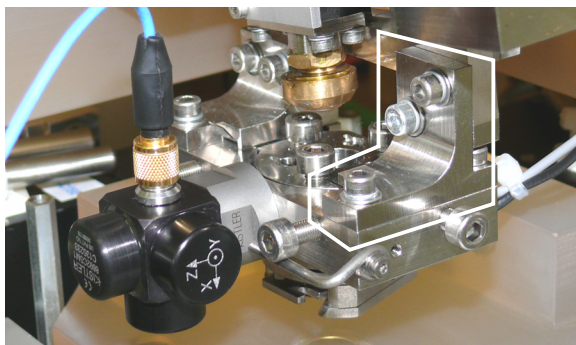


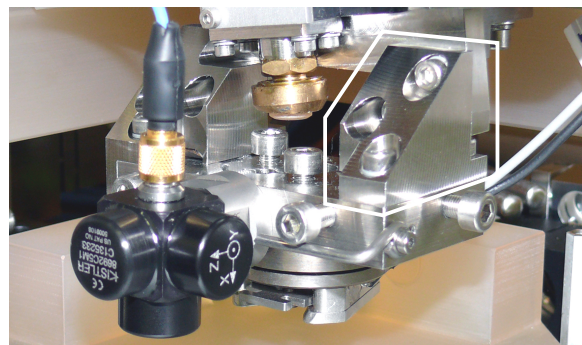
Abbildung 6.6: Aufbau der Justiereinheiten der Sondenaufnahme

(1 Stellschrauben, 2 Grundkörper, 3 Schlitten, 4 Druckfeder, 5 Kippplatte, 6 Zugfeder, 7 piezoelektrischer Antrieb)

Eine weitere Justiereinheit – der Kippversteller – wurde im Schlitten (3) integriert (vgl. Abbildung 6.6). Der Kippversteller wurde mit einer kinematisch bestimmter Koppelstelle [39, 206] in Form von drei V-Nut-Kugel-Paarungen realisiert (vgl. Abbildung 6.6(b)). Die drei Stellschrauben (1) sind auf einem Kreis mit jeweils 120° Versatz im Schlitten (3) angeordnet (vgl. Abbildung 6.6(a)). Im Zentrum des Kreises befindet sich eine Öffnung mit einem Durchmesser von 10 mm für den Messstrahl und das Sichtfeld der Kamera. Die drei V-Nuten sind um die Öffnung der Kippplatte (5) radial mit einer Winkeldistanz von 120° platziert (vgl. Abbildung 6.6(b)). Die V-Nut-Kugel-Paarungen wurden parallel zur x - y -Ebene angeordnet (vgl. Abbildung 6.6(b)). Die Kippplatte (5) wird über Zugfedern (6) gegen die Auflagekugeln gedrückt. Durch die Drehung der Stellschrauben (1) sind Kippungen um die x - und y -Achse sowie Verstellung entlang der z -Achse (3 Freiheitsgrade) möglich. Auf der Unterseite der Kippplatte wurde der piezoelektrische Antrieb (7) befestigt. An der Unterseite des Piezos (7) befinden sich drei Gewindebohrungen zur Befestigung der Sondenhalterung bzw. des Halte- und Wechselsystems für den *Cantilever*. Für die Sondenhalterung wurde eine Bauhöhe von 7 mm vorgesehen.



(a) Befestigung mit L-Halter



(b) Halterungselemente in Dreiecksform

Abbildung 6.7: Anordnung zur Messung der Schwingbeschleunigung an der modifizierten Sondenaufnahme

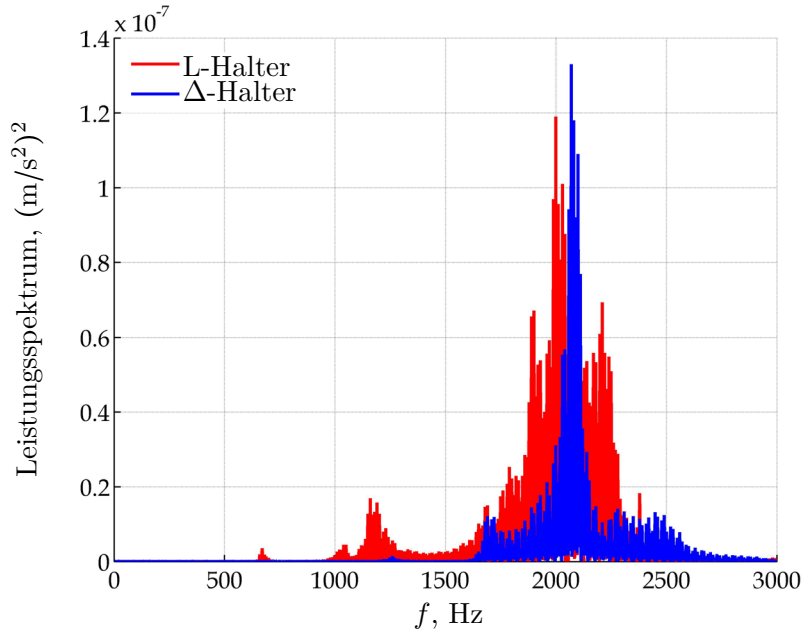


Abbildung 6.8: Vergleich der Leistungsspektren in z Richtung bei einer sprungförmigen Anregungsamplitude

Die neue Sondenhalterung wurde in Anlehnung an das AFM-System der Firma DME Nanotechnologie GmbH⁹ entwickelt. Der miniaturisierte runde *Cantilever*-Träger (1) (vgl. Abbildung 6.9) mit einer rechteckigen Öffnung in der Mitte wurde aus einem 1 mm starken ferromagnetischen Werkstoff hergestellt. Auf einer Seite des Trägers wurden drei um 120° versetzte Kugeln eingepresst und auf der anderen Seite eine Abschrägung für die Befestigung des *Cantilevers* (2) durch Kleben eingearbeitet. Somit können beliebige Sonden (auch ohne *Alignment* Struktur) eingesetzt werden. Das Kleben des *Cantilevers* (bzw. der Sonde) erfolgt dabei manuell. Optional kann auch eine im Rahmen des SFB 622 entwickelte Klebevorrichtung eingesetzt werden [68]. Als Klebstoff eignen sich gut dünnflüssige schnelltrocknende Cyanacrylate wie z. B. LOCTITE 408 und 420 der Firma Henkel AG & Co. KGaA. Es wurden mehrere identische Träger gefertigt, die auch

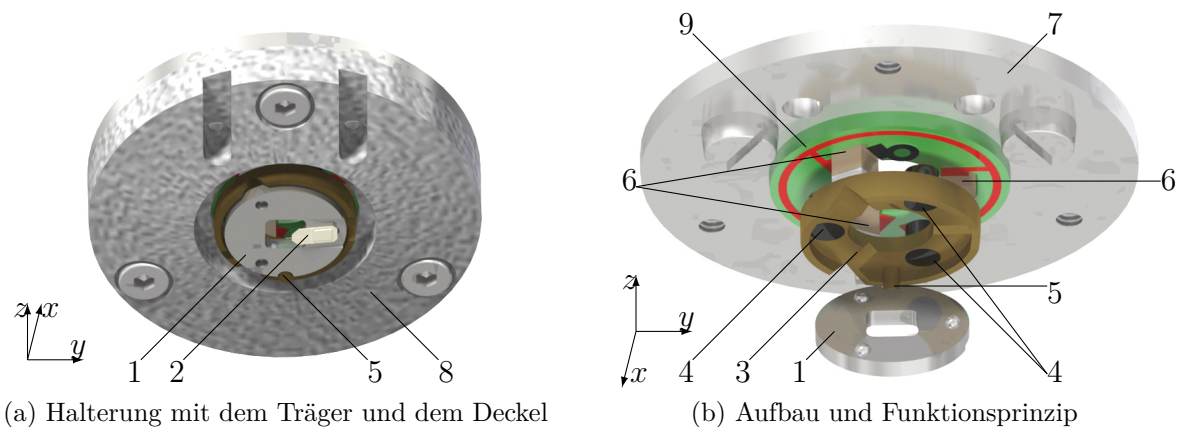


Abbildung 6.9: Modifizierte Sondenhalterung (1 *Cantilever*-Träger, 2 *Cantilever*, 3 Trägerhalter, 4 Permanentmagnet, 5 Verdrehsicherung, 6 Shaker-Piezo, 7 Zwischenplatte, 8 Schutzdeckel, 9 Leiterplatte)

⁹<https://dme-spm.de>. Stand: November 2018.

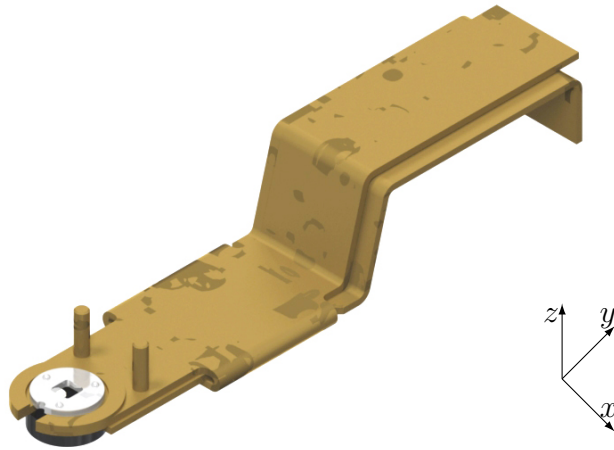


Abbildung 6.10: Sondenwechselwerkzeug

in den im Rahmen des SFB 622 entwickelten Messobjekthalter mit dem Trägermagazin und elektromagnetischen Trägerwechsler zum automatischen Austausch vom *Cantilever*-Träger [68, 219], eingesetzt werden können. Die Träger (1) und später auch der Trägerhalter (3) wurden zum Korrosionsschutz mit einer Nickelschicht galvanisiert. Der Trägerhalter (3) schließt neben den drei V-Nuten drei Permanentmagnete (4) für das Anziehen und das Halten des Trägers (1) mit dem *Cantilever* (2) ein (vgl. Abbildung 6.9(b)). Um die korrekte Einbaulage des Biegebalken des *Cantilevers* in y - z -Ebene zu gewährleisten, wurde eine Verdrehsicherung (5) im Trägerhalter (3) eingebracht. Oberhalb der V-Nuten des Trägerhalters (3) wurden drei Shaker-Piezos (6) angeordnet. Die Sondenhalterung wurde mittels einer Zwischenplatte (7) an der Unterseite des piezoelektrischen Antriebes befestigt und mit einem Schutzdeckel (8) abgedeckt (vgl. Abbildung 6.9(a)). Im Deckel wurde Führungshilfe für das Sondenwechselwerkzeug, in der Form einer Schiebevorrückung (vgl. Abbildung 6.10), zur manuellen Zu- und Wegführung des *Cantilever*-Trägers eingearbeitet. Die Baugruppe der Sondenhalterung wurde derart gestaltet, dass die Position des Trägers (1) bzw. des *Cantilevers* (2) vor und nach dem Wechseln nahezu übereinstimmen. Die Justage des *Cantilevers* in allen Richtungen und Kippwinkeln wird einmalig bei dem ersten Einbau des Trägers durchgeführt. Bei einem späteren Austausch des *Cantilevers* (bzw. auch des Trägers) ist nur eine geringe Nachjustierung nötig.

6.3 Mikroskopkamarasystem

Als Hilfsmittel während der Justage der Sonde, zur Orientierung der Sonde auf dem Messobjekt sowie zur Kontrolle des Antast¹⁰- und Messvorganges ist ein visuelles Beobachtungssystem (Mikroskopkamarasystem) erforderlich. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein solches System nicht in den Strahlengang des Sondenmesssystems eingegliedert werden kann, da für die Integration ein zusätzlicher neutraler Strahlteiler (NT) in den Strahlengang des Sondenmesssystems eingebracht werden müsste, was zu einer Verschlechterung des Ausgangssignals des Sondenmesssystems führen würde. Hinsichtlich der Auswahl der Brennweite der Fokussierlinse stehen die Forderungen an Empfindlichkeit des Lichtzeigers

¹⁰engl. *approach* oder *landing*.

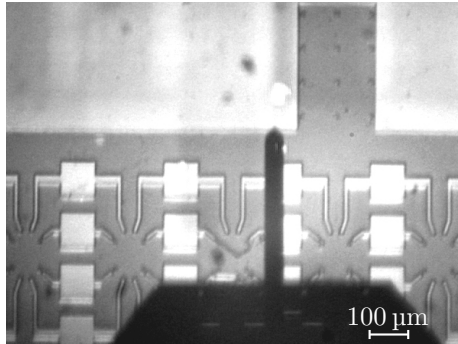


Abbildung 6.11: Kamerabild

und der Vergrößerung des Mikroskopkamarasystems im Widerspruch. Während für den Lichtzeiger eine möglichst große Brennweite vorteilhaft ist (vgl. Abschnitt 5.2, S. 40), benötigt das Kamarasystem eine kleinere Brennweite und große numerische Apertur.

Im Mikroskopkamarasystem (z. B. des Fokussensors [146]) befindet sich der Gegenstand (die Sonde) in der Brennebene des Objektivs (Fokussierlinse) und wird nach Unendlich abgebildet. Die Abbildungsvergrößerung Γ ergibt sich durch die Kombination aus Objektiv und Tubuslinse des Mikroskops [146]: $\Gamma = f_t/f$. Für eine Vergrößerung von etwa 4 bis 8 und eine Fokussierlinse mit $f = 40$ mm beläuft sich die Tubusbrennweite auf $f_t = 160 \dots 320$ mm. Dies wird zu sehr großen baulichen Abmessungen des Mikroskopkamarasystems führen. Das Mikroskopkamarasystem kann mit einer nahezu senkrechten Blickrichtung auf das Messobjekt nur neben dem Sondenmesssystem angeordnet werden (vgl. Abbildung 6.1, S. 55). Es wurde ein kommerzielles telezentrisches Miniaturobjektiv mit einem großen Arbeitsabstand von ≈ 110 mm und eine koaxiale Lichteinkopplung für die Beleuchtung der Firma Sill Optics GmbH & Co. KG ausgewählt. Um den Wärmeeintrag des Kamarasystems so gering wie möglich zu halten, erfolgt die Lichtversorgung über ein Faserbündel einer Kaltlichtquelle. Das Objektiv verfügt über einen C-Mount, um beliebige Kameras (z. B. CCD-Kameras) anschließen zu können. Es wurden unterschiedliche analoge Kamera mit BNC Videoausgang, USB-, FireWire- sowie CMOS-Kameras eingesetzt. Wegen der geringen Verlustleistung von 50 mW [81] wurde die CMOS-Kamera bevorzugt. Das maximale Objektfeld (bzw. darstellbare Fläche) des Objektivs wird durch die Abbildungsvergrößerung und die Größe des Kamerasensors vorgegeben. Bei einer vierfachen Vergrößerung und $1/3''$ ($4,8 \text{ mm} \times 3,6 \text{ mm}$) Kamerasensor beträgt das laterale Objektfeld $1,2 \text{ mm} \times 0,9 \text{ mm}$, bei einem $1/2''$ ($6,4 \text{ mm} \times 4,8 \text{ mm}$) (vgl. Abbildung 6.11) entsprechend $1,6 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$. Berücksichtigt man die Abmessungen der Sonde (vgl. Abschnitt 4.1.2, S. 23), dann wird ersichtlich, dass die optimale Abbildungsvergrößerung zwischen 4 und 8 liegt. Eine Überschreitung dieser Werte führt lediglich zur Vergrößerung der Oberfläche des *Cantilevers* und bringt keine neue Informationen über das Messobjekt.

Durch die Anordnung des Kamarasystems (bzw. des Objektivs (4)) neben dem Sondenmesssystem (1) ergibt sich eine Ausrichtung von etwa $6^\circ - 8^\circ$ zum Flächennormal eines ebenen Messobjektes (vgl. Abbildung 6.12). Dabei liegt die Blickrichtung in gleicher (y - z -) Ebene wie der Messstrahl des Sondenmesssystems (1) und der Biegebalken mit der Antastspitze des *Cantilevers* (vgl. Abbildungen 6.1 und 6.12). Der große Arbeitsabstand ermöglicht eine Umlenkung des objektseitigen Strahlengangs und eine horizontale Ein-

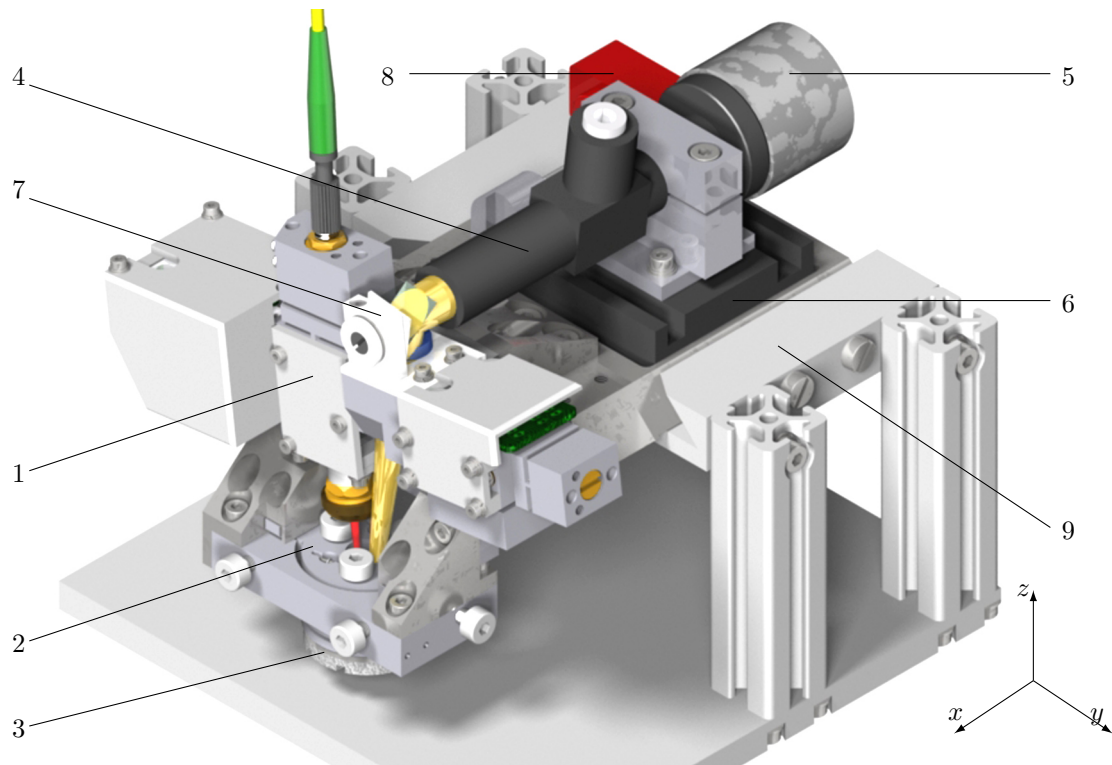


Abbildung 6.12: LiAFM in Aufbewahrungsbox

(1 Sondenmesssystem, 2 Sondenaufnahme, 3 Sondenhalterung, 4 Objektiv, 5 Kamera, 6 Verschiebetisch, 7 Umlenkspiegelhalterung, 8 Linearaktor, 9 Aufbewahrungsbox)

baulage des Kamerasystems (bzw. des Objektivs (4)) auf einem Verschiebetisch (6). Im Grundkörper des Sondenmesssystems (1) wurde eine Ausfräsung für das Sichtfeld der Kamera und eine Halterung für den Umlenkspiegel (7) vorgesehen. Das Bildfeld und die Blickrichtung des Kamerasystems können durch die Verschiebung der Halterung sowie die Kippung des Umlenkspiegels (7) ausgerichtet werden (vgl. Abbildung 6.12). Der Arbeitsabstand wird mittels des Verschiebetisches (6) mit einem *Picomotor* Linearaktor (8) eingestellt. Somit ist es möglich, die Messobjektoberfläche auch vor dem Antasten zu betrachten und ohne Öffnen der Akustikhaube der NMM-1 das Kamerasystem auf die Sonde auszurichten [51]. Zur Ausblendung des störenden Laserlichtes des Messstrahls im Kamerabild wurde ein Farbfilter im Sichtfeld der Kamera eingebracht.

Das nächste Kapitel 7 widmet sich der Integration des aufgebauten LiAFM in die NMM-1 sowie der Kalibrierung deren Ausgangssignale.

7 Laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop (LiAFM) als Tastsystem der NMM-1

Das laserinterferometrische Rasterkraftmikroskop (LiAFM) wurde hauptsächlich für den Einsatz als ein Antastsystem in der NMM-1 entworfen. Die NMM-1 ist ein 3D-Multisensor-Positionier- und Messsystem mit einem Mess- und Positionierbereich von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. Im Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) wurde die NMM-1 in Zusammenarbeit mit der SIOS Meßtechnik GmbH entwickelt [80]. Im Rahmen des SFB 622 wurde die NMM-1 weiterentwickelt und optimiert. Die Messauflösung wurde auf $0,1\text{ nm}$ und die Positionierunsicherheit auf weniger als 10 nm [189] verbessert.

Die Grundaufbau der NMM-1 basiert auf der dreidimensionalen Anwendung des Abbe-Komparatorprinzips [80]. Die drei Längen- (1, 2, 3), zwei Winkelmesssysteme (4, 5) der NMM-1 und ein Tastsystem (6) sind an einem stabilen ausdehnungsarmen Metrologierahmen (7) befestigt (vgl. Abbildung 7.1). Der mechanische Aufbau der NMM-1 erlaubt eine einfache Integration des Antastsystems (vgl. Abschnitt 7.1). Die Messachsen der Längenmesssysteme (1, 2, 3) schneiden sich virtuell in dem Antastpunkt des Tastsystems (6) mit

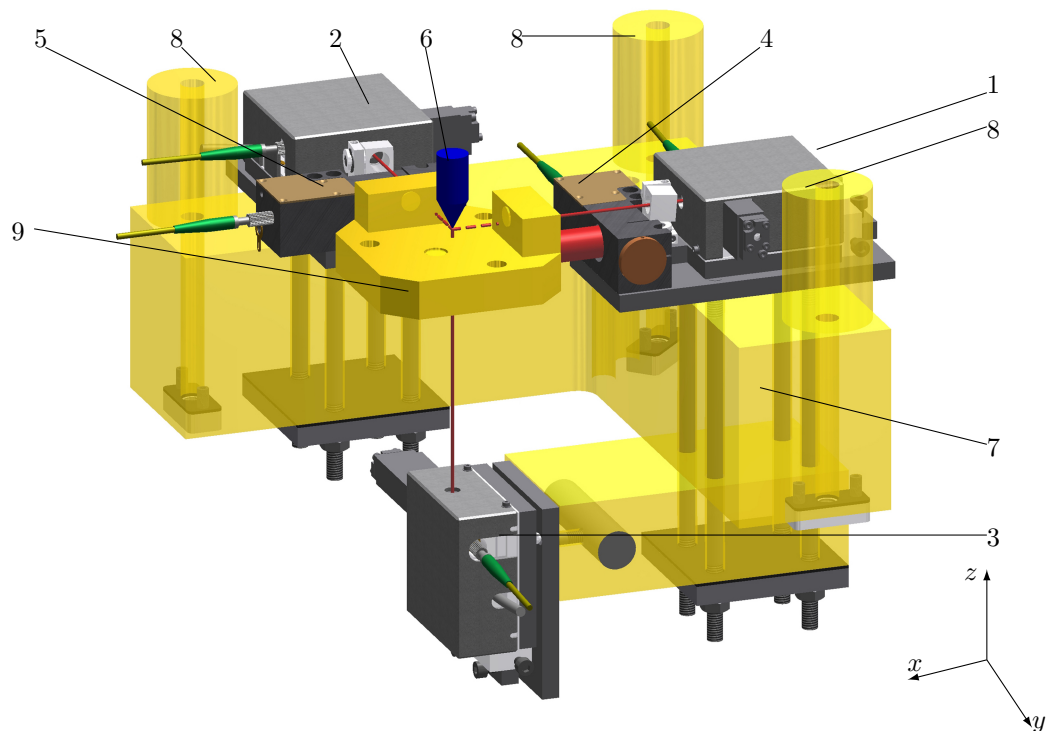


Abbildung 7.1: Grundaufbau der NMM-1

(1 x -Interferometer, 2 y -Interferometer, 3 z -Interferometer, 4 Nick- und Gierwinkelsensor, 5 Roll- und Gierwinkelsensor, 6 Tastsystem, 7 Metrologierahmen, 8 Befestigung für das Tastsystem, 9 Spiegelecke)

dem Messobjekt [108]. Das Messobjekt liegt auf einer Spiegelecke (9) und wird zusammen mit dieser während der Messung bewegt. Die Bewegungen der Spiegelecke (9) werden mittels eines dreiachsigen Positioniersystem mit serieller Kinematik, Wälzkörperführungen mit Kugeln und elektromagnetischen Linearantrieben ausgeführt [81]. Als Längenmesssystem werden polarisationsoptische Planspiegelinterferometer nach dem Homodynprinzip eingesetzt. Die Interferometer (1, 2, 3) erfassen die Position der Spiegelecke (9) und somit des Messobjektes. Als Winkelmesssysteme (4, 5) zur Erfassung der rotatorischen Führungsabweichungen bzw. Verkippen der Spiegelecke während der Bewegung dienen Autokollimatoren. Die DSP-Einheit der NMM-1 ist für die Erfassung und Verarbeitung der Messsignale der Längen-, Winkel- und Antastsystems, Messablaufsteuerung sowie Positions- und Winkelregelung zuständig. Die Steuerung des Messablaufes der NMM-1 erfolgt über die USB-Schnittstelle durch einen PC. Als eine Bediensoftware kann ein speziell entwickelter MATLAB[®]-*toolbox* eingesetzt werden [78, 81].

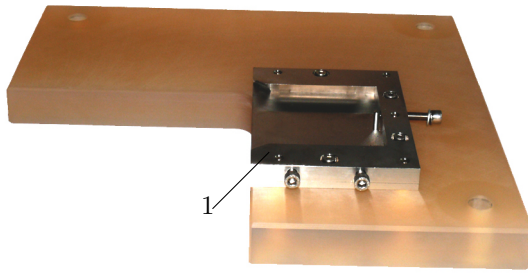
Nachfolgend wird die Einbindung des LiAFM in die NMM-1 und die Kalibrierung dessen Signale dargestellt.

7.1 Mechanische Einbindung in die NMM-1

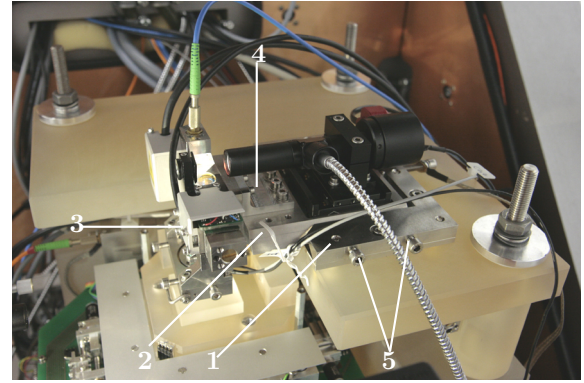
Als mechanische Schnittstelle der NMM-1 für die Einbindung des Tastsystems dient eine Zerodurplatte (vgl. Abbildung 7.2(a)). Die Platte wird auf drei Zerodursäulen der NMM-1 (vgl. Abbildung 7.1) aufgelegt und festgeschraubt. Der Abbepunkt befindet sich 28 mm unterhalb der Auflagefläche der Zerodursäulen. Das Tastsystem soll auf der Platte so befestigt werden, dass der Antastpunkt (des Tastsystems) im Abbepunkt der NMM-1 liegt [81].

Für das LiAFM wurde die Zerodurplatte in Form eines rechten Winkels (vgl. Abbildung 7.2(a)) realisiert. An einem Schenkel des Zerodurwinkels befindet sich eine Führungsschiene (1) aus Invar 36[®]. Der dazugehörige prismatische Führungskörper (2) (vgl. Abbildung 7.2(b)) wurde auf der Rückseite des Sondenmesssystems (3) mittels zwei Haltern in Dreiecksform (4) befestigt [51]. Der Führungskörper (2) dient auch als Halterung für das Objektiv des Kamerasystems (vgl. Abschnitt 6.3, S. 62). Eine solche Aufnahme des Antastsystems (vgl. Abbildung 7.2) hat den Vorteil, dass der Führungskörper (2) mit dem LiAFM nicht abheben kann, da dieser durch die Einschubgeometrie gehalten wird. Der Führungskörper (2) (mit dem LiAFM) wird in die Einschubschiene (1) bis zum Anschlag eingefügt und mittels zwei Schrauben (5) an der vordefinierten Position festgeklemmt [51]. Die Zerodurplatte verfügt über drei Befestigungsbohrungen mit Spielpassungen. Durch laterale Verschiebung der Zerodurplatte vor der Verschraubung mit den Zerodursäulen erfolgt die laterale Ausrichtung der Sonde auf den Abbepunkt der NMM-1. Die Ausrichtung kann mittels des Beobachtungskamerasystems der NMM-1 überprüft werden [81]. Diese Justage erfolgt einmalig nach dem Einbau der Zerodurplatte.

Nach der mechanischer Integration des LiAFM in die NMM-1 erfolgt die elektrische Einbindung, welche im nächsten Abschnitt erklärt wird.



(a) Trägerplatte aus Zerodur® des LiAFM



(b) LiAFM integriert in die NMM-1

Abbildung 7.2: Mechanische Einbindung des Antastkopfes in die NMM-1

(1 Führungsschiene, 2 prismatischer Führungskörper, 3 Sondenmesssystem, 4 Halter, 5 Befestigungsschraube)

7.2 Elektrische Einbindung in die NMM-1

Der mechanische Aufbau des LiAFM wurde durch eine speziell aufgebaute Elektronikereinheit der Firma SIOS Meßtechnik GmbH zur Versorgung und Messsignalvorverarbeitung ergänzt (vgl. Abbildung 7.3). Das Sondenmesssystem wird durch polarisationserhaltende Monomode-LWL mit Licht eines He-Ne-Laser (das Laserausgangsmodul LA-02 (1)) versorgt. Das Sondenmesssystem des LiAFM stellt vier Signale der Fotodioden des PSD und vier Signale der optoelektronischen Einheit zur Auswertung des Interferenzbildes zur Verfügung. Diese Messsignale werden mittels zweier geschirmter elektrischer Kabel entsprechend zur Winkelmesskarte PSD-03 (2) und zum analogen Eingangsmodul EM-05 (3) der Versorgung- und Auswerteeinheit übertragen. In der Winkelmesskarte (2) erfolgt die Verarbeitung der vier Fotodiodensignale des PSD zu den Ausgangssignalen S_x und S_y (Torsion und Biegung der Sonde, vgl. Gleichung (5.11), S. 47) mit der maximalen Ausgangsspannung von ± 10 V. Das analoge Eingangsmodul EM-05 (3) dient zusammen mit dem digitalen Reglermodul RG-04 (4) zur Verstärkung, Offset- und Amplitudenregelung der beiden sinusförmigen (cos- und sin-) Interferometersignale S_{\cos} und S_{\sin} . Die

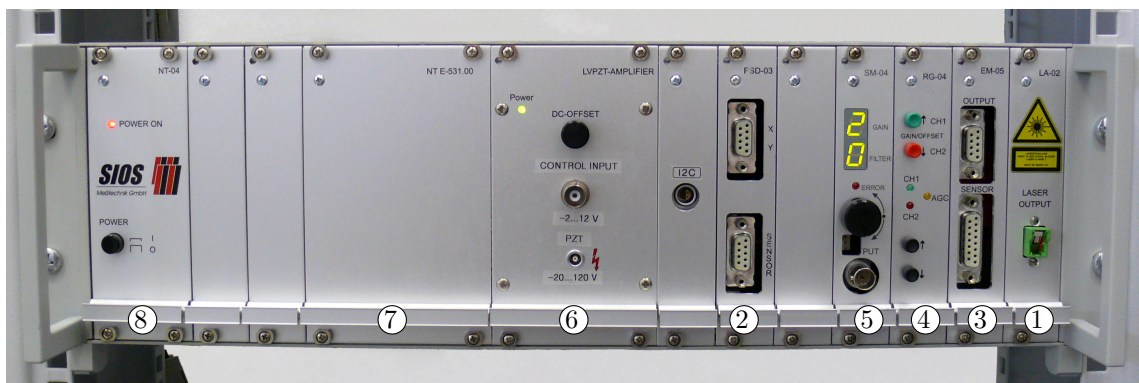


Abbildung 7.3: Elektronikereinheit des LiAFM

(1 LA-02, 2 PSD-03, 3 EM-05, 4 RG-04, 5 SM-04, 6 E-505, 7 NT E-531.00, 8 NT-04)

beiden Signale können zusätzlich abgegriffen werden und zum einen zur Anzeige einer Lissajousfigur¹¹ auf einem zweikanaligen Oszilloskop, die zur Justage der Sonde benutzt wird, übertragen werden. Zum anderen können die Interferometersignale zum zusätzlichen Demodulationskanal, im Falle der Benutzung der neuen DSP-Einheit (mit dem digitalen Signalprozessor TMS320C6713B) der NMM-1, übertragen werden [81]. Das wegproportionale Analogsignal S_{SM-04} (mit der maximalen Ausgangsspannung von ± 3 V) liefert die Schwingungsmesskarte SM-04 (5). Zur Berechnung der Längeninformation werden dabei die aufbereiteten Interferometersignale vom Eingangsmodul EM-05 (3) benutzt. In der Schwingungsmesskarte SM-04 können die maximalen Frequenzen des Tiefpassfilters zur Minimierung des Ausgangsrauschens (z. B. FILTER = 0 für $f = 10$ kHz) und Messbereichsfaktor k_{SM-04} bzw. Messbereich (z. B. GAIN = 0 für $0,63 \mu\text{m}$, GAIN = 1 für $2,50 \mu\text{m}$ und GAIN = 2 für $10,10 \mu\text{m}$) der Schwingungsmesskarte SM-04 (5) eingestellt werden [205].

Die Elektroneinheit des LiAFM beinhaltet einen LVPZT-AMPLIFIER bzw. Piezoverstärkermodule E-505 (6) mit dem dazugehörigen Netzteil NT E-531.00 (7) der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG zur Steuerung des piezoelektrischen Antriebes der Sondenaufnahme (vgl. Abschnitt 6.2, S. 58). Die Verbindung der Elektroneinheit zum Netzanschluss stellt das Netzteilmodul NT-04 (8) her. Dieses Modul stellt die Betriebsspannungen für die anderen Module der Elektroneinheit bereit.

Das LiAFM liefert fünf analoge weg- (cos-, sin- und SM-04-) und winkelproportionale (Biegung und Torsion) Ausgangssignale und benötigt Eingangssignale für die Steuerung des hochdynamischen piezoelektrischen Antriebes ($-2 \dots 12$ V) und der Shaker-Piezos ($0 \dots 100$ V). Das Stellsignal für die Shaker-Piezos gibt der Funktionsgenerator des *lock-in*-Verstärkers aus (vgl. Abschnitt 7.2.2). Ein Positionsregler des aktiven Tastsystems liefert die Stellspannung S_s zum Piezoverstärkermodule E-505 (6) und somit für den piezoelektrischen Antrieb (vgl. Abschnitt 7.2.3), dabei kann als Führungsgröße z. B. das Biegungssignal S_y der Winkelmesskarte PSD-03 (2) benutzt werden.

Der Hauptbestandteil der Elektronik der NMM-1 ist die DSP-Einheit. Sie verarbeitet alle einkommenden Messsignale, regelt die Antriebssysteme und steuert den Messablauf [80]. Für die Einbindung der analogen Messsignale des Tastsystems stellt die DSP-Einheit der NMM-1 die 16-Bit-A/D-Wandlerkanäle mit einem Spannungsbereich von ± 10 V bereit. Das sind entweder die vier Kanäle a_0 , a_1 , a_4 und a_5 der auf dem DSP TMS320C31 beruhenden Einheit, oder die acht Kanäle $a_0 - a_7$ und ein zusätzlicher Demodulationskanal l_a der DSP-Einheit auf Basis des TMS320C6713B [81]. Das Tastsystem wird über BNC-Kabel mit den BNC-Buchsen der A/D-Wandlerkanäle verbunden.

Die Einbindung des LiAFM in die NMM-1 ist in der Abbildung 7.4 dargestellt. Im weiteren werden die Besonderheiten der Verwendung der Ausgangssignale des Antastsystems für die Arbeit des LiAFM in unterschiedlichen Betriebsarten erläutert (vgl. Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2).

¹¹Die Amplitude der geregelten cos- und sin-Interferometersignale S_{\cos} und S_{\sin} beträgt $1,5$ V, der Durchmesser der Lissajousfigur umfasst dabei 3 V.

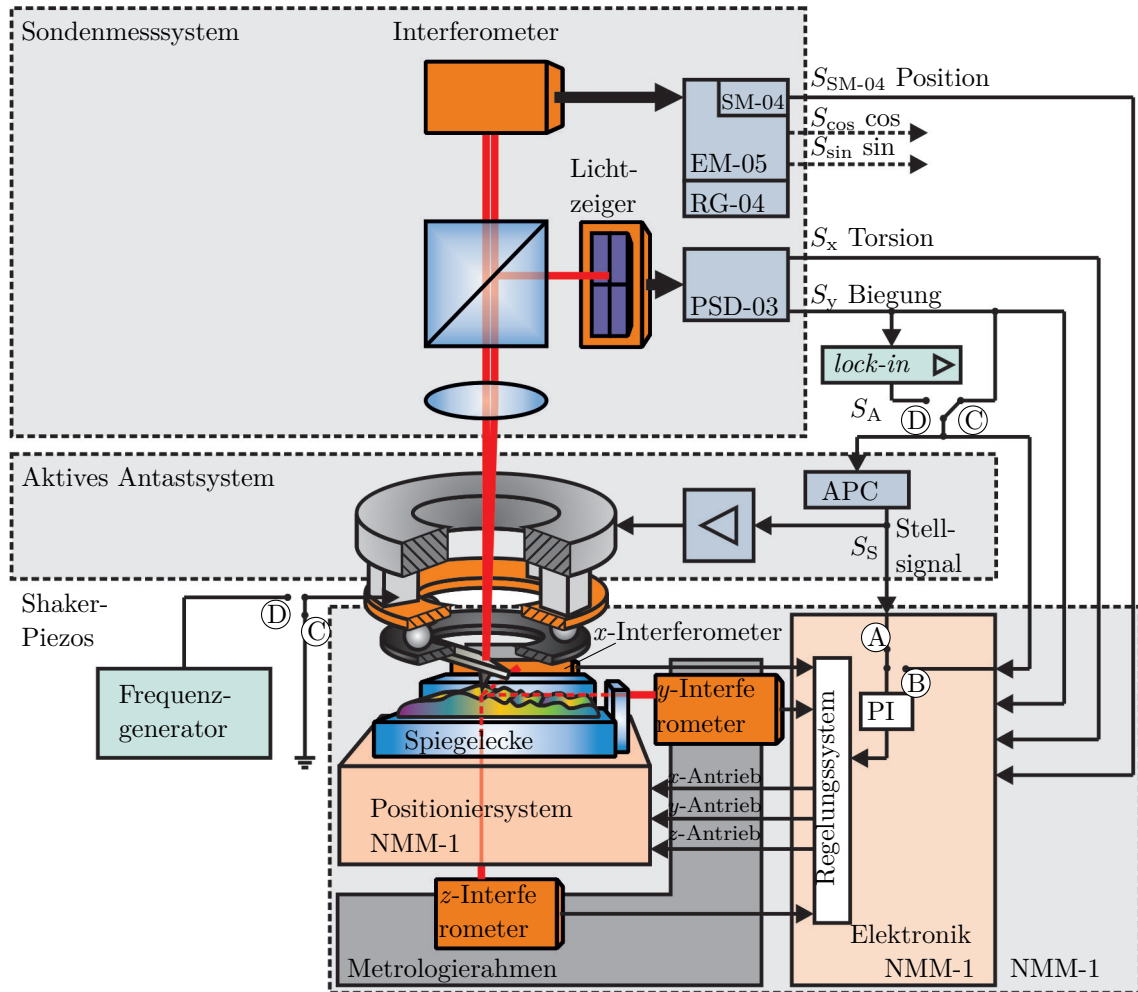


Abbildung 7.4: Elektrische Einbindung des Antastkopfes in die NMM-1

Tastsystem (A&B) Betriebsart (C&D)

Schaltstellungen: A – aktives, C – CM,
 B – passives D – IM

7.2.1 *Contact*-Modus (CM)

Für die Realisierung des *Contact*-Modus (CM) (vgl. Abschnitt 4.1.3, S. 25) ist lediglich ein zur Auslenkung (Durchbiegung) des *Cantilevers* proportionales Ausgangssignal des Sondenmesssystems notwendig. Dieses Signal wird für die Antastregelung der NMM-1 genutzt. Als solches Signal kann das Biegungssignal S_y der Winkelmesskarte PSD-03 oder das wegproportionale Spannungssignal S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04 benutzt werden. Die beiden Signale werden entsprechend an die A/D-Wandlerkanäle a_0 und a_1 angeschlossen. Die cos- und sin-Signale des Eingangsmoduls EM-05 (vgl. Abbildung 7.3) können an den Demodulationskanal l_a der DSP-Einheit TMS320C6713B angeschlossen werden und zur Bestimmung des Interferometerwertes l_a benutzt werden. Das Torsionssignal S_x dient der Abbildung der Reibungseigenschaften der Messobjektoberfläche und wird an den A/D-Wandlerkanal a_4 der DSP-Einheit angeschlossen (vgl. Tabelle 7.1).

	DSP TMS320C6713B	DSP TMS320C31, CM	DSP TMS320C31, IM
a_0	Biegung PSD-03 S_y	Biegung PSD-03 S_y	Amplitude <i>lock-in</i> S_A
a_1	wegproportionales Signal SM-04 S_{SM-04}	wegproportionales Signal SM-04 S_{SM-04}	wegproportionales Signal SM-04 S_{SM-04}
a_2	Amplitude <i>lock-in</i> S_A		
a_3	Phase <i>lock-in</i> ¹² S_ϕ		
a_4	Torsion PSD-03 S_x	Torsion PSD-03 S_x	Biegung PSD-03 S_y
a_5	Stellsignal APC S_S	Stellsignal APC S_S	Stellsignal APC S_S
l_a	cos und sin EM-05 S_{\cos} und S_{\sin}		

Tabelle 7.1: Elektrische Einbindung des Antastkopfes in die NMM-1 (Anschlussbelegung)

7.2.2 Intermittent-Modus (IM)

Für die Realisierung des *Intermittent*-Modus (IM) (vgl. Abschnitt 4.1.3, S. 25) wird die Sonde mittels Shaker-Piezos zu einer Schwingung angeregt. Die Anregungsfrequenz liegt dabei nahe der Resonanzfrequenz des *Cantilevers*. Die Schwingungsamplitude S_A des Biegungssignals S_y wird mittels eines *lock-in*-Verstärkers detektiert und dann für die Antastregelung (anstatt des Biegungssignals S_y im CM) der NMM-1 genutzt. Das Amplitudensignal S_A wird am A/D-Wandlerkanal a_2 (bzw. a_0 , vgl. Tabelle 7.1) angeschlossen. Zuerst wurde das Model 7280 *Wide Bandwidth DSP lock-in-Amplifier* (mit integriertem Frequenzgenerator zur Steuerung von Shaker-Piezos) der Firma AMETEK GmbH eingesetzt. Dieser *lock-in*-Verstärker zeichnet sich durch eine kleine Zeitkonstante und somit schnelle Detektion der Amplitudenänderung, eine hohe Abtastfrequenz des Eingangssignals, eine hohe Empfindlichkeit des Signalkanals und großen Arbeitsbereich (bis zu 2 MHz) aus. Allerdings ist eine schnelle Ausgabe der Phase, gleichzeitig mit der Schwingungsamplitude, leider nicht möglich. Ein weiterer Nachteil ist der geringe Spannungsbereich der Ausgangssignale von $\pm 2,5$ V.

Es wurde ein weiterer HF2LI *lock-in*-Verstärker der Firma Zurich Instruments AG eingesetzt. Dieses Gerät ermöglicht neben noch schnellerer Detektion der Amplitudenänderung bzw. Amplitude S_A die gleichzeitige Ausgabe der Phasenverschiebung S_ϕ zwischen Anregungssignal und Oszillation des *Cantilevers* (kann z. B. am A/D-Wandlerkanal a_3 angeschlossen werden). Zusätzlich beinhaltet der *lock-in*-Verstärker eine Phasenregelschleife (*phase-locked loop*) für die Bestimmung der Frequenzverschiebung und ein PID-Regler für die Regelung der Schwingungsamplitude auf einen konstanten Wert. Die Phasenschleife und der PID-Regler können für die Realisierung des *Non-Contact*-Modus (NCM) (vgl. Abschnitt 4.1.3, S. 25) benutzt werden [240]. Im IM bleibt das Anregungssignal zur Steuerung den Shaker-Piezos konstant. Der Spannungsbereich der Ausgangssignale (z. B. Amplitude S_A und Phase S_ϕ) beträgt ± 10 V. Allerdings wird der Eingangsspannungsbereich des *lock-in*-Verstärkers mit $\pm 3,3$ V angegeben und somit kann eine zu große Durchbiegung der Sonde

¹²HF2LI *lock-in*-Verstärker der Firma Zurich Instruments AG.

oder die Dejustierung des Biegungssignals S_y zur Beschädigung des *lock-in*-Verstärkers führen.

Die weiteren Signale des Sondenmesssystems (Spannungssignal S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04, Biegungs- S_y und Torsionssignal S_x) können entsprechend an die A/D-Wandlerkanäle a_1 , a_0 und a_4 angeschlossen werden (vgl. Tabelle 7.1, S. 70).

7.2.3 Aktives Antastsystem

Ein aktives Antastsystem ist ein Tastsystem mit einem mittels eines dynamischen Positioniersystems mit kleinen Stellbereichen bewegten Tastelement [81]. Während der Messungen wird die Kombination der Bewegungen der Spiegelecke der NMM-1 und des Antastsystems benutzt. Das Positioniersystem führt schnelle Bewegungen um einen Arbeitspunkt in der Mitte seines Stellbereiches aus, um die Auslenkung des Tastelements (bzw. die Antastkraft) konstant zu halten. Währenddessen ist die NMM-1 für langsame Bewegungen verantwortlich, die Auslenkung des Positioniersystems wird dabei in der Mitte seines Stellbereiches gehalten. Dadurch erlaubt das aktive Antastsystem höhere Messgeschwindigkeiten [81, 93].

Im LiAFM dient ein piezoelektrischer Antrieb (vgl. Abschnitt 6.2, S. 58) als Positioniersystem in z -Richtung. Für die Steuerung des Piezoantriebes ist ein Regler erforderlich. Der Regler kann in ein speziell entwickeltes Messdatenerfassungs- und -Verarbeitungssystem für aktive Antastsysteme *Active Probe Controller* (APC) [30] implementiert werden (vgl. Abbildung 7.5). Die wesentlichen Komponenten des APC sind 16-Bit-A/D- und D/A-Wandlermodule und ein leistungsfähiger DSP TMS320C6713B [30]. Die ± 10 V Eingangs- und Ausgangssignale des APC können an der Frontplatte des Gehäuses an den BNC-Buchsen "ANALOG INPUT" und "ANALOG OUTPUT" Ch0...Ch7 angeschlossen werden (vgl. Abbildung 7.6). Die Software des APC ist modular aufgebaut und ermöglicht eine Anpassung an die verschiedenen Anwendungen einschließlich der Implementierung eines Reglers. Der einprogrammierte Regler kann über die serielle Schnittstelle (RS-232) konfiguriert werden. Der APC wurde als ein quasianaloger PID- (vgl. Abbildung 7.7(a)) und ein modifizierter PI-Regler mit Notchfiltern (vgl. Abbildung 7.7(b)) mit einer Abtastfrequenz (bzw. der Samplingfrequenz) von 62,5 kHz programmiert [204, 221]. Der PID- und PI-Regler unterscheiden sich von den konventionellen Reglerstrukturen durch Begrenzung des I-Anteils (durch `IntegratorLowerLimit` und `IntegratorUpperLimit`). Diese Begrenzung verhindert die permanente Erhöhung der Stellgröße, wenn z. B. die Sonde nicht im Kontakt mit der Messobjektoberfläche ist und der Piezoantrieb sich an der Stellbereichsgrenze befindet, wodurch ungewollte Verzögerungen des Regelungssystems nach Kontakt mit

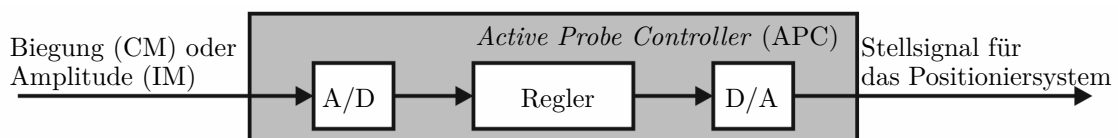


Abbildung 7.5: Struktur des APC für das Antastsystem [221]

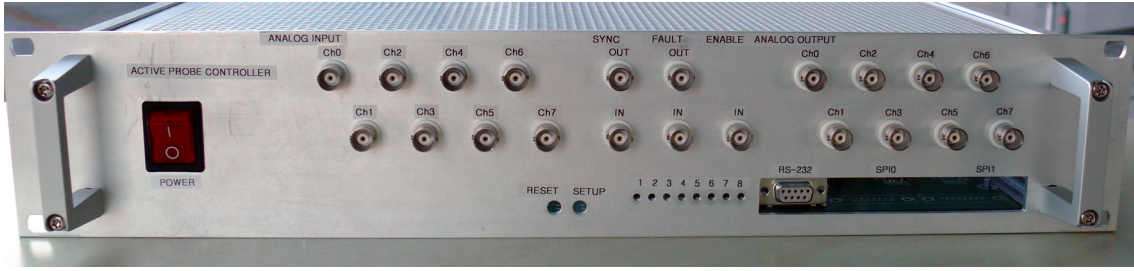


Abbildung 7.6: Active Probe Controller (APC)

der Oberfläche vermieden werden. Die Übertragungsfunktionen $G(s)$ der beiden Regler sind [204]:

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (7.1)$$

mit $K_p = 0,12$, $K_i = 4000$, $K_d = 0,000001$ und

$$G_{\text{Notch-PI}}(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) \overbrace{\frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2}{s^2 + 2\omega_1 + \omega_1^2}}^{N_1(s)} \overbrace{\frac{s^2 + 2\zeta_2\omega_2 + \omega_2^2}{s^2 + 2\omega_2 + \omega_2^2}}^{N_2(s)} \quad (7.2)$$

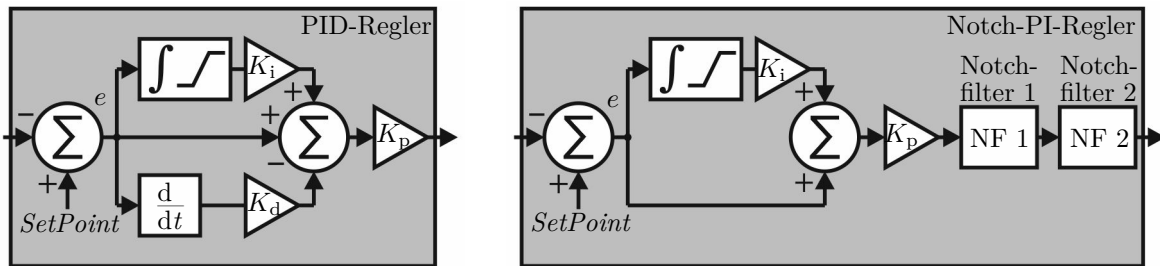
mit $K_p = 0,12$ und $K_i = 20000$. Die Notchfilter bzw. die Bandsperrfilter 2. Ordnung (mit den Übertragungsfunktionen $N(s)$, Kreisfrequenzen $\omega = 2\pi f$ und Dämpfungsfaktoren ζ , vgl. Gleichung (7.2)) unterdrücken die beiden Resonanzfrequenzspitzen von $f_1 = 18\,462$ Hz, $f_2 = 2222$ Hz [221].

Für die oben beschriebene Notchfilter [204, 221] ergeben sich die diskreten Übertragungsfunktionen $N(z)$ bei Anwendung der z -Transformation zu

$$N_1(z) = \frac{n_{0,1} + \frac{n_{1,1}}{z} + \frac{n_{2,1}}{z^2}}{1 + \frac{d_{1,1}}{z} + \frac{d_{2,1}}{z^2}}, \quad N_2(z) = \frac{n_{0,2} + \frac{n_{1,2}}{z} + \frac{n_{2,2}}{z^2}}{1 + \frac{d_{1,2}}{z} + \frac{d_{2,2}}{z^2}}. \quad (7.3)$$

Dabei sind $n_{i,j}$ ($i = 0 \dots 2$, $j = 1 \dots 2$) und $d_{i,j}$ ($i = 1 \dots 2$, $j = 1 \dots 2$) Koeffizienten (Zähler und Nenner) für Konfiguration den Notchfilter im APC (vgl. Anhang E, S. 165).

Die Bandbreite des modifizierten PI-Reglers beträgt 802,3 Hz [204]. Die Reglerparameter beider PID- und modifizierten PI-Regler wurden experimentell bestimmt und können jederzeit verändert werden. Es wurden spezielle MATLAB®-Funktionen für die



(a) quasianaloger modifizierter PID-Regler (b) quasianaloger modifizierter PI-Regler mit Notchfiltern

Abbildung 7.7: Regelkreisstrukturen des APC

Konfiguration des Reglers des APC entwickelt, welche neben der Auswahl der Filter (`Notch1_Enable`, `Notch2_Enable` gleich 0 oder 1) sowie Einschaltung/Ausschaltung des Reglers (`EnablePID` = 0 oder 1), Anpassung der Reglerparameter K_p , K_i und K_d (`GainKp`, `GainKn` und `GainKv`), eine Angabe des Sollwertes *SetPoint* $a_{i,SP}$ (`SetPoint` in Digit) der Auslenkung sowie den Koeffizienten der (linearen) Auslenkungskennlinie (der Anstieg `SensorGain` negativ in IM und gleich -1 oder positiv in CM und gleich 1 sowie `SensorOffset` in V, vgl. auch nächster Abschnitt 7.3) des Tastelements ermöglichen. Die wichtigsten Parameter für die Konfiguration des Reglers sind in der Tabelle E.1 im Anhang E, S. 165 zusammengefasst.

7.3 Kalibrierung des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM)

Vor der Durchführung von Messungen sollen die Ausgangssignale des LiAFM in Wegsignale anhand von Polynomkoeffizienten umgerechnet werden [49, 225]. Die Polynomkoeffizienten können aus den Auslenkungskennlinien der Ausgangssignale des Sondenmesssystems berechnet werden. In kommerziellen AFM wird die Auslenkung der Sonde oft einheitslos oder nur als Strom in nA ohne Bezug auf die Messlänge und Messkraft angegeben.

Für die Kalibrierung wird zuerst eine ebene Fläche eines Messobjektes durch die Bewegung der Spiegelecke der NMM-1 in die Nähe der Antastspitze des *Cantilevers* gebracht und dann vertikal in Richtung der Spitze über einen bestimmten Messbereich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Währenddessen werden die Interferometersignale der NMM-1 und Ausgangssignale des Sondenmesssystems durch die DSP-Einheit der NMM-1 synchron aufgezeichnet. Durch den Einsatz der rückgeführten Längenmesssysteme der NMM-1 kann dieser Vorgang auch als Kalibrierung des LiAFM bezeichnet werden [81]. Die Kalibrierung des LiAFM erfolgt nur in z -Richtung. Die Kalibrierung von (kommerziellen) AFM läuft vorwiegend mit Hilfe spezieller Normalen ab [58]. Für die AFM-Kalibrierung wurde die Richtlinie VDI/VDE 2656 Blatt 1 [180] entwickelt. Weiterhin kann das AFM für das Kalibrieren seiner Bewegungsachsen nachträglich mit Laserinterferometern ausgestattet werden [76, 119, 232, 233].

Die 3D-Messablaufsteuerung der NMM-1 benötigt eine umfangreiche Initialisierung des Antastsystems vor der Durchführung von Messungen (vgl. Tabelle F.1 im Anhang F, S. 167). Vor allem ist die Angabe der Sicherheitsgrenzen des Antastsystems, Reglerparametern der Antastregelung und Polynomkoeffizienten notwendig. Die Polynomkoeffizienten (k_{d_x} , k_{d_y} , \dots , k_{p_z}) und deren Unsicherheiten ($u^2(k_{d_x})$, $u^2(k_{d_y})$, \dots , $u^2(k_{p_z})$) werden mittels Regression ermittelt und für die Berechnung der Auslenkungen (d_x , d_y , d_z) und Positionen (p_x , p_y , p_z) benutzt [81]. Die Berechnung der Polynomkoeffizienten basiert auf dem von Prof. K.-D. Sommer und Dr. B.R.L. Siebert entwickelten Verfahren der Bereichskalibrierung [208]. Für die Ausgangssignale des LiAFM wurden lineare (und somit driftunempfindliche) Kennlinien ausgewählt. Die Koeffizienten der Ausgleichsgeraden und deren Unsicherheiten kann man mit den nachfolgenden Gleichungen (7.4) und (7.5) ermit-

teln. Stellvertretend für Kalibrierkoeffizienten der Kennlinien weiterer Ausgangssignale des LiAFM dient die Berechnung den Polynomkoeffizienten k_{d_z} des Biegungssignals S_y im *Contact*-Modus (CM):

$$\begin{array}{l} \text{Offset} \\ \text{Anstieg} \end{array} \quad k_{d_z} = \frac{1}{\overline{a_0^2} - \overline{a_0}^2} \begin{bmatrix} \overline{a_0^2 l_z} - \overline{a_0} \overline{a_0 l_z} \\ \overline{a_0 l_z} - \overline{a_0} \overline{l_z} \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

und

$$u^2(k_{d_z}) = \frac{u^2(l_z)}{m \left(\overline{a_0^2} - \overline{a_0}^2 \right)} \begin{bmatrix} \overline{a_0^2} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7.5)$$

Hierin bedeutet

a_0 A/D-Wandlerwerte des an den A/D-Kanal a_0 angeschlossenen Biegungssignals S_y ,

l_z Messwerte des z -Interferometers der NMM-1,

$u(l_z)$ kombinierte Unsicherheit der z -Achse der NMM-1 nach [189], S. 75,

m Anzahl der Messpunkte.

Stellvertretend für die Auslenkungen in den weiteren Richtungen d_x , d_y und Positionen p_x , p_y , p_z ist die Berechnung der Auslenkung d_z in z -Richtung in Gleichung (7.6) vorgestellt [81]:

$$\begin{aligned} d_z = & \overbrace{k_{d_{z0}}}^{\text{Offset}} + \overbrace{k_{d_{z1}}a_0 + k_{d_{z2}}a_0^2 + k_{d_{z3}}a_0^3}^{a_0} + \overbrace{k_{d_{z4}}a_1 + k_{d_{z5}}a_1^2 + k_{d_{z6}}a_1^3 + \dots}^{a_1} \\ & + \overbrace{k_{d_{z19}}a_6 + k_{d_{z20}}a_6^2 + k_{d_{z21}}a_6^3}^{a_6} + \overbrace{k_{d_{z22}}a_7 + k_{d_{z23}}a_7^2 + k_{d_{z24}}a_7^3}^{a_7} + \overbrace{k_{d_{z25}}l_a}^{l_a}. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Im Falle des an den A/D-Kanal a_0 angeschlossenen Biegungssignals S_y kann die Auslenkung d_z folgend berechnet werden:

$$d_z = \overbrace{k_{d_{z0}}}^{\text{Offset}} + \overbrace{k_{d_{z1}}a_0}^{\text{Anstieg}}. \quad (7.7)$$

Die Residuen r (bzw. die Abweichungen der Kalibrierung) und deren Unsicherheiten u_r können mit den nachfolgenden Gleichungen nach [81] beschrieben werden:

$$r = \begin{bmatrix} 1 & a_{0,1} \\ 1 & a_{0,2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & a_{0,m} \end{bmatrix} k_{d_z} - l_z, \quad (7.8)$$

$$u_r^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (r_j - \bar{r})^2. \quad (7.9)$$

Die berechneten Polynomkoeffizienten und deren Unsicherheiten sind anhand von aufgenommenen Kalibrierkennlinien des LiAFM in den Tabellen 7.3, S. 78 (*Contact*-

Modus (CM)) und 7.4, S. 80 (*Intermittent*-Modus (IM)) in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst.

Die 3D-Messablaufsteuerung der NMM-1 benötigt außer den oben erwähnten Polynomkoeffizienten für die Berechnung der Auslenkungen d_x , d_y , d_z in alle drei Antastrichtungen x , y , z , die Grenzwerte dieser Auslenkungen (`MaxNegDef.x`, `MaxPosDef.x`, `MaxNegDef.y`, ...), welche der Sicherheitsüberwachung während den Messungen dienen sowie die Federkonstanten bzw. Steifigkeiten (`SprRat.x`, `SprRat.y`, `SprRat.z`) für die Berechnung der Messkraft F_m für die Kraftregelung [81]. Die wichtigsten Parameter der Konfiguration und Initialisierung des LiAFM als passives und aktives Tastsystem sind in Tabelle F.1 im Anhang F, S 167 zusammengefasst. Im passiven Tastsystem erfolgt die Antastregelung bzw. Kraftregelung nur durch die Bewegung der Spiegelecke der NMM-1. Ein aktives Tastsystem entsteht durch die Kombination eines passiven Tastsystems mit einem Positioniersystem zur Bewegung der Sonde (vgl. vorheriger Abschnitt 7.2.3).

Für die Kraftregelung (Antastregelung) eines passiven Antastsystems werden die Grenzwerte F_l (`ForceLower`) und F_u (`ForceUpper`), Umschaltsschwelle (`ForceThreshold`) und Sollwert $SetPoint\ d_{z,SP}$ (`ForceSetPoint`) sowie Proportionalbeiwert K_p (`ForceContKp`) und Integrierbeiwert K_i (`ForceContKn`) des PI-Antastreglers der NMM-1 gebraucht (vgl. Tabelle F.1(b)). Dabei müssen die Grenzwerte sowie die Umschaltsschwelle und der Sollwert stets positiv sein. Für die Regelung eines aktiven Antastsystems sind für jede x -, y - und z -Achse drei separate PI-Positionsregler mit den Proportionalbeiwerten K_p (`PositionContX.GainKp`, ...), Integrierbeiwerten K_i (`PositionContX.GainKn`, ...) und Sollpositionen in der Mitte der Stellbereiche der Positioniersysteme des Tastsystems (`PositionContX.SetPoint`, ...) notwendig. Wobei für das LiAFM der Positionsregler nur für die z -Achse relevant ist.

Die Art des Antastsystems (passives oder aktives) wird über die Bitmaske `OptionMask` (vgl. Tabelle F.1(b), S. 168) festgelegt. Bei der Antastung wird die Kraftregelung (passives Tastsystem) oder die dreidimensionale Positionsregelung (aktives Tastsystem) nach dem Überschreiten der Umschaltsschwelle `ForceThreshold` eingeschaltet und entweder auf `ForceSetPoint` (passives Tastsystem) oder, im Falle des LiAFM, auf `PositionContZ.SetPoint` (aktives Tastsystem) geregelt. Wenn während des Messvorganges die Grenzwerte F_l (`ForceLower`) unterschritten bzw. F_u (`ForceUpper`) überschritten werden, wird die Bewegung der Spiegelecke der NMM-1 gestoppt und die Kraftregelung bzw. Positionsregelung abgeschaltet.

Im weiteren wird die Kalibrierung des LiAFM für die Messungen im *Contact*-Modus (CM) und *Intermittent*-Modus (IM) vorgestellt.

7.3.1 *Contact*-Modus (CM)

Der Kalibriervorgang besteht aus zwei Etappen. Die erste Etappe ist die Kalibrierung des Biegungssignals S_y und des wegproportionalen Analogsignals S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04 (sowie Interferometerwertes l_a der DSP-Einheit TMS320C6713B) bei stillgelegtem piezoelektrischen Antrieb. Das ist eine Kalibrierung des passiven Antastsys-

tems (`OptionMask` = 0). Um eine Beschädigung der Antastspitze zu vermeiden wird der *Cantilever* während des Kalibriervorganges nur um bis zu ca. 500 nm durchgebogen. Die aufgenommenen Kalibrierkennlinien sind in Abbildung 7.8 gezeigt.

Die Polynomkoeffizienten k_{dz} (vgl. Tabelle F.1(a), S. 167), bzw. der Offset k_{dz0} und der Anstieg k_{dz1} , werden aus einer linearen Regression über die Messwerte des Biegungssignals S_y und der Längenmesswerte des z -Interferometers l_z entsprechend Gleichung (7.4) ermittelt. Das Biegungssignal S_y wird anhand der Polynomkoeffizienten k_{dz} nach Gleichung (7.6) bzw. (7.7) in die Auslenkung d_z umgerechnet. Die Messauflösung (bzw. der Anstieg k_{dz1} der linearen Kennlinie) für das Biegungssignal innerhalb des Arbeitsbereiches beträgt ca. 0,03 nm (vgl. Tabelle 7.3). Dieser Wert stimmt mit der theoretisch ermittelten Auflösung von 0,04 nm (vgl. Tabelle 5.1, S. 49) überein.

Da die Auslenkungen d_x und d_y in x - und y -Richtungen gleich Null sind und die Federkonstante `SprRat.z` der Sonde im LiAFM als 1 angenommen ist (vgl. Tabelle F.1(b), S. 168), entspricht die Messkraft F_m der Auslenkung d_z in z -Richtung: $F_m = d_z 1 \text{ N/m}$. Aus der Kennlinie des Biegungssignals S_y (vgl. Abbildung 7.8(a)) können entsprechend Arbeitsbereich und Sollwert *SetPoint* $a_{0,SP}$ definiert werden [49] und anhand der Polynomkoeffizienten k_{dz} für die Kraftregelung umgerechnet werden. Die Grenzwerte der Auslenkungen des Biegungssignals `MaxNegDef.z` und `MaxPosDef.z` werden mit gültigen Werten, die z. B. kleiner als $-F_u$ und größer als F_u sind, initialisiert. Als Grenzwerte der Auslenkungen in x - und y -Richtungen werden nicht erreichbare Werte wie z. B. ± 40000 (vgl. Tabelle F.1(b)) gesetzt. Die beiden Parameter K_p und K_i des zeitdiskreten PI-Kraftreglers betragen entsprechend 0,5 (bzw. liegen im Bereich von 0,01 bis 1) und 1200 (10...2000). Die Beiwerte K_p und K_i können nach einem Antast- und Scanvorgang bei Bedarf angepasst werden.

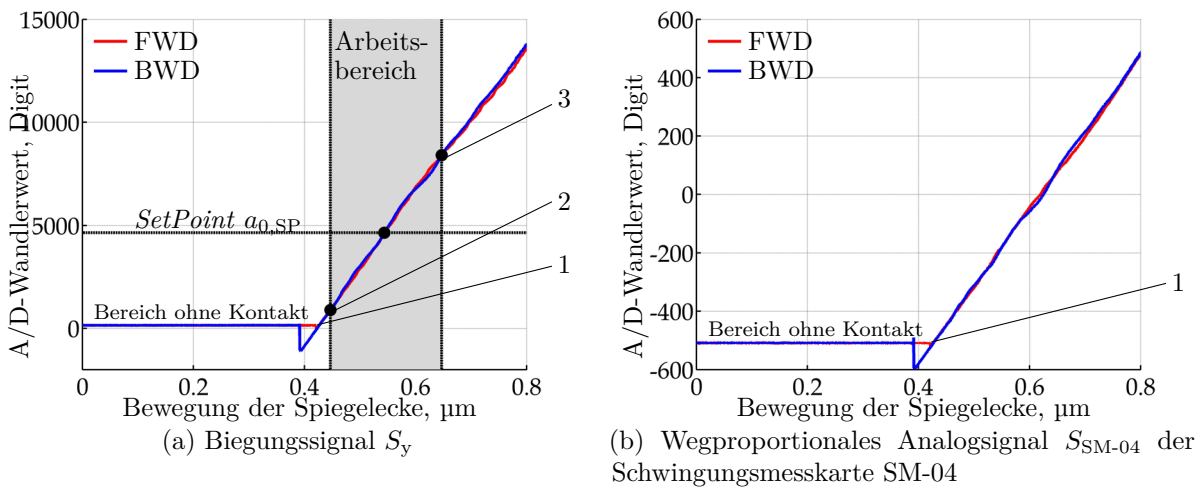
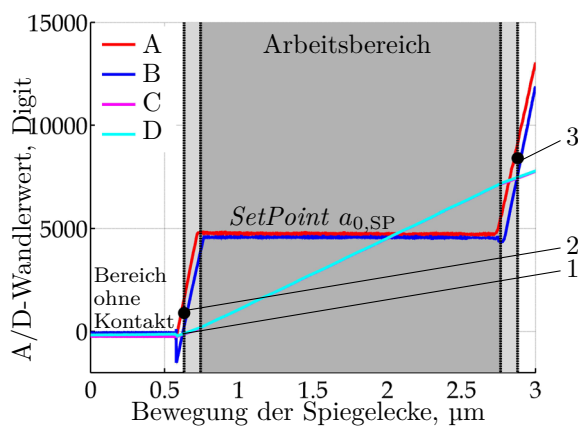


Abbildung 7.8: Kalibrierkennlinien des passiven Antastsystems

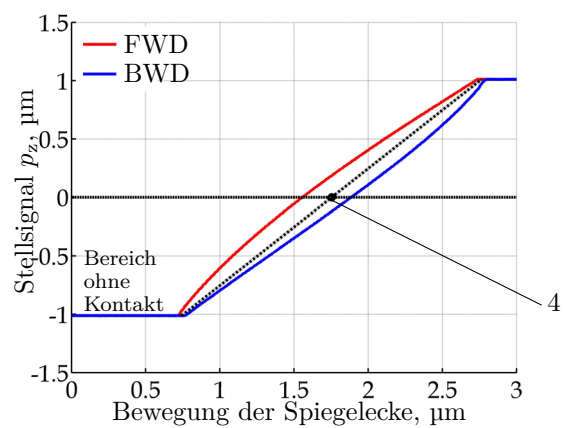
(1 Kontakt mit der Messobjektoberfläche, 2 und 3 Auslenkungen, welche F_l (`ForceLower`) und F_u (`ForceUpper`) entsprechen, FWD und BWD Bewegung der Spiegelecke in positive und negative z -Richtung)

Für die Realisierung des *Contact*-Modus (CM) werden mindestens die oben genannten Angaben benötigt. In diesem Fall funktioniert das LiAFM als passives Antastsystem und das Messergebnis ist eine Differenz zwischen dem kalibrierten Biegungssignal d_z und z -Interferometersignal l_z . Auch werden Offset k_{pz0} und Anstieg k_{pz4} des wegproportionalen Signals S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04 (sowie, im Falle DSP TMS320C6713B, Interferometers l_a) ermittelt. Die Messauflösung bzw. der Anstieg k_{pz4} des Signals S_{SM-04} bei unterschiedlichen Messbereichen der Schwingungsmesskarte SM-04 sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

Um das LiAFM als aktives Antastsystem (**OptionMask** = 2) betreiben zu können, ist ein zweiter Kalibriervorgang notwendig. Deshalb ist der zweite Schritt die erneute Kalibrierung des wegproportionalen Signals S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04, diesmal als Auslenkung d_x sowie des Interferometerwertes l_a unter Verwendung des piezoelektrischen Antriebes und somit der Regelung des Biegungssignals (vgl. Abschnitt 7.2.3, S. 71). Während der Kalibrierung wird das Messobjekt mit der Spiegelecke der NMM-1, wie auch im ersten Schritt, in vertikaler Richtung positioniert. Jedoch wird der *Cantilever* gleichzeitig mit Hilfe des piezoelektrischen Antriebes innerhalb seines Arbeitsbereiches nachgeführt, sodass die Durchbiegung des *Cantilevers* (bzw. das Biegungssignals S_y) konstant bleibt und dem im ersten Schritt vorgegebenen Sollwert *SetPoint* $d_{z,SP}$ (**ForceSetPoint**) entspricht (vgl. Abbildung 7.9(a)). Der Stellbereich des Piezoantriebes (beträgt $2\mu\text{m}$, vgl. Abbildung 7.9(b)) entspricht dem Arbeitsbereich des LiAFM, wenn die Spiegelecke der NMM-1 während der Messung auf konstanter Höhe (z -Position) gehalten wird. Soll jedoch die Spiegelecke in z -Richtung nachgeführt werden, so muss das Stellsignal S_s des Piezos als Eingangssignal für die DSP-Einheit der NMM-1 dienen (vgl. Tabelle 7.1, S. 70 und



(a) Biegungs- S_y und wegproportionales Analogsignal S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04 (A Biegung S_y FWD, B Biegung S_y BWD, C Wegsignal S_{SM-04} FWD, D Wegsignal S_{SM-04} BWD,)



(b) Verrechnetes Stellsignal S_s des piezoelektrischen Antriebes

Abbildung 7.9: Kalibrierkennlinien des aktiven Antastsystems

(1 Kontakt mit der Messobjektoberfläche, 2 und 3 Auslenkungen, welche F_l (**ForceLower**) und F_u (**ForceUpper**) entsprechen, 4 $p_{z,SP}$ (**PositionContZ.SetPoint**), FWD und BWD Bewegung der Spiegelecke in positive und negative z -Richtung)

GAIN	$k_{\text{SM-04}}$, $\mu\text{m/V}$	passives Tastsystem, Anstieg k_{p_z4} , nm/Digit	aktives Tastsystem, Anstieg k_{d_x4} , nm/Digit
0	0,25	0,09	-
1	0,99	0,4	0,29
2	4,03	1,7	1,4

Tabelle 7.2: Messbereiche der Schwingungsmesskarte $S_{\text{SM-04}}$

Abbildung 7.4, S. 69). Die Polynomkoeffizienten k_{p_z} und deren Unsicherheiten $u(k_{p_z})$ werden aus einer linearen Regression über das Stellsignal S_s des Piezos entsprechend der Gleichungen (7.4) und (7.5) berechnet und in der Tabelle 7.3 zusammengetragen. Durch einen zusätzlichen Offset, von der Hälfte des Piezostellbereiches, kann die Kennlinie (optional) versetzt werden. Der Sollwert $p_{z,\text{SP}}$ (**PositionContZ.SetPoint**) für die Regelung liegt in der Mitte des Stellbereiches des piezoelektrischen Antriebes und ist gleich Null (vgl. Abbildung 7.9(b)). Die Beiwerte **PositionContZ.GainKp** und **PositionContZ.GainKn** des Positionsreglers gleichen den beiden Parametern K_p und K_i des Kraftreglers und können bei Bedarf angepasst werden. Die Hysterese und das Kriechen des piezoelektrischen Antriebes haben keinen Einfluss auf die Kalibrierkennlinie des wegproportionalen Signals $S_{\text{SM-04}}$ der Schwingungsmesskarte SM-04 und des Interferometers l_a (vgl. Abbildung 7.9(a)). Der Anstieg k_{d_x4} der Kennlinie des Signals $S_{\text{SM-04}}$ der Schwingungsmesskarte SM-04 bzw. die Messauflösung in Abhängigkeit von Messbereich sind in der Tabelle 7.2 zusammengetragen. Der Messstrahl des Sondenmesssystems ist nicht parallel zu der z -Achse der NMM-1. Seine Ausrichtung wird auch durch den Neigungswinkel des *Cantilevers* bestimmt. Die Schiefelage des Messstrahls wird durch die Kalibrierung des Signals $S_{\text{SM-04}}$ sowie des Interferometerwertes l_a berücksichtigt.

Das Messergebnis h einer Oberflächenmessung wird beim passiven Tastsystem als Differenz zwischen den in die Position p_z umgerechneten wegproportionalen Ausgangssignalwerten $S_{\text{SM-04}}$ der Schwingungsmesskarte SM-04 und den z -Interferometerwerten l_z angegeben:

$$h = p_z - l_z. \quad (7.10)$$

	Offset, nm	u , nm	Anstieg, nm/Digit	u , nm/Digit
passives Tastsystem				
Biegung k_{d_z}	421,8	0,4	0,03	$76 \cdot 10^{-6}$
Interferometer k_{p_z}	618,9	0,3	0,378	$1,1 \cdot 10^{-3}$
aktives Tastsystem				
Interferometer k_{d_x}	684,82	0,09	0,29	$21 \cdot 10^{-6}$
Regler k_{p_z}	1009,15	0,09	-0,06	$5 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 7.3: Die Kalibrierkoeffizienten und deren Unsicherheiten

Beim aktiven Tastsystem ist die Differenz zwischen dem in die Auslenkung d_x umgerechneten wegproportionalen Ausgangssignalwerten S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04 und den z -Interferometerwerten l_z :

$$h = d_x - l_z. \quad (7.11)$$

Auch können die umgerechneten Interferometerwerte l_a für die Berechnung des Messergebnisses h eingesetzt werden:

$$h = l_a - l_z. \quad (7.12)$$

7.3.2 *Intermittent*-Modus (IM)

Vor Messungen im *Intermittent*-Modus (IM) sollen die Ausgangssignale des LiAFM ebenfalls kalibriert werden. Der Kalibriervorgang ist dem im vorherigen Abschnitt 7.3.1 beschriebenen ähnlich. Die erste Etappe ist die Kalibrierung des passiven Tastsystems (`OptionMask` = 0). Nur anstatt des Biegungssignals S_y wird die Dämpfung der Schwingungsamplitude S_A kalibriert. Zu Beginn wird die Eigenfrequenz des *Cantilevers* mittels Frequenzgenerator und Oszilloskop des *lock-in*-Verstärkers bestimmt (vgl. Abschnitt 7.2.2). Für die Kalibrierung des Amplitudensignals S_A (vgl. Tabelle 7.1, S. 70) und während der Messungen wird der *Cantilever* mit einer festen Frequenz unterhalb der Resonanzfrequenz zur Schwingungen angeregt [127] (vgl. Abschnitt 4.1.3, S. 25). Dabei wird die Anregungsamplitude so angepasst, dass der Bereich des linearen Kennlinienanstiegs des Amplitudensignals S_A ca. 80 bis 100 nm beträgt. Die aufgenommene Kennlinie des Amplitudensignals S_A ist in der Abbildung 7.10(a) zu sehen. Es werden Offset k_{dz0} und der Anstieg k_{dz7} aus der Regression über den Arbeitsbereich der Kennlinie entsprechend der Gleichung (7.4) berechnet. Die Messauflösung k_{dz7} beträgt ca. 0,04 nm (vgl. Tabelle 7.4) unter Verwendung des *lock-in*-Verstärkers der Firma AMETEK GmbH und ca. 0,006 nm bei der HF2LI *lock-in*-Verstärker der Firma Zurich Instruments AG. In gleicher Weise wie bei Kalibrierung im *Contact*-Modus (CM) (vgl. vorheriger Abschnitt 7.3.1) werden Grenzwerte der Auslenkungen, Arbeitsbereich und Sollwert *SetPoint* $d_{z,SP}$ (`ForceSetPoint`) der Amplitude definiert [54]. Der *SetPoint* sowie die Anregungsfrequenz haben direkten Einfluss auf die Messkraft während den Messungen [127]. Es werden die gleichen Beiwerte des PI-Reglers wie für den statischen Betrieb (CM) eingesetzt. Das Messergebnis wird als Differenz zwischen dem in die Auslenkung d_z umgerechneten Amplitudensignal S_A und den z -Interferometerwerten l_z angegeben:

$$h = d_z - l_z. \quad (7.13)$$

Die gemittelte Position bzw. Auslenkung (Durchbiegung) des *Cantilevers* bleibt während des Kalibriervorganges unverändert. Somit entfällt die Berechnung der Kalibrierkoeffizienten für das wegproportionale Signal S_{SM-04} sowie Interferometersignal l_a .

Die zweite Etappe ist die Kalibrierung des aktiven Tastsystems (`OptionMask` = 2). Der Ablauf gleicht dem im vorherigen Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Kalibriervorgang, wobei

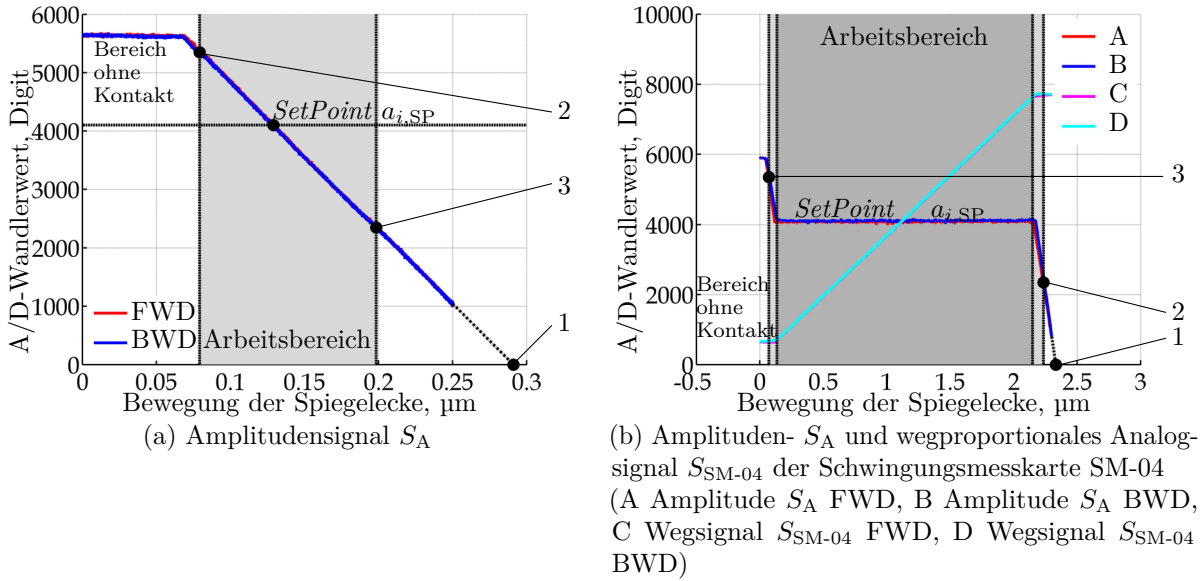


Abbildung 7.10: Kalibrierkennlinien des passiven (a) und aktiven (b) Antastsystems (1 Kontakt mit der Messobjektoberfläche, 2 und 3 Auslenkungen, welche F_l (ForceLower) und F_u (ForceUpper) entsprechen, FWD und BWD Bewegung der Spiegelecke in positive und negative z -Richtung)

das Interferometersignal l_a nicht verwendet wird. Da die Abtastfrequenz (bzw. der Samplingfrequenz) der NMM-1 6,25 kHz beträgt [80, 81] und die Schwingungsfrequenz der Sonde ≥ 75 kHz, führt dies zur Unterabtastung des Interferometersignals l_a . Die unterabgetastete Ausgabe der Interferometerwerte l_a könnte durch den Einsatz eines Tiefpassfilters, wie bei der Schwingungsmesskarte SM-04, vermieden werden. Das Messergebnis wird als Differenz zwischen den in die Auslenkung d_x umgerechneten wegproportionalen Ausgangssignalwerten S_{SM-04} der Schwingungsmesskarte SM-04 und den z -Interferometerwerten l_z berechnet (vgl. Gleichung (7.11)) und entspricht dabei den Höhenwerten der Messobjektoberfläche während des Scans (vgl. Kapitel 9). Die nach Gleichung (7.5) ermittelten Unsicherheiten der Polynomkoeffizienten (vgl. Tabellen 7.3 und 7.4), insbesondere der Auslenkung k_{d_x} , werden für die Unsicherheitsanalyse einer Messung benötigt (vgl. Abschnitt 8.2.7). Das nachfolgende Kapitel 8 widmet sich den messtechnischen Eigenschaften des LiAFM und schließlich der Unsicherheit und der Wiederholbarkeit der Tastsystemkalibrierung.

	Offset, nm	u , nm	Anstieg, nm/Digit	u , nm/Digit
passives Tastsystem				
Amplitude k_{d_z}	289,7	0,4	-0,04	$90 \cdot 10^{-6}$
aktives Tastsystem				
Interferometer k_{d_x}	-76,6	0,5	0,29	$96 \cdot 10^{-6}$
Regler k_{p_z}	1033,2	0,4	-0,06	$21 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 7.4: Die Kalibrierkoeffizienten und deren Unsicherheiten

8 Messtechnische Eigenschaften des laserinterferometrischen Rasterkraftmikroskops (LiAFM)

Die messtechnischen Eigenschaften des LiAFM, wie Auflösung, Rauschen, Langzeitstabilität, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Antastung sind von sehr vielen Faktoren und Komponenten des Gesamtsystems abhängig. In diesem Kapitel wird zuerst das Sondenmesssystem des LiAFM betrachtet. Speziell werden dabei die Umwelteinflüsse auf die interferometrische Positionsmessung analysiert und die Umweltabhängigkeit des Sondenmesssystems ermittelt. Danach wird das integrierte LiAFM in die NMM-1 als Gesamtsystem charakterisiert. Es werden Umgebungsbedingungen, Kalibrierkennlinien und Langzeitstabilität betrachtet, das Signalrauschen ermittelt sowie der Einfluss der Antastspitze auf die Messergebnisse analysiert. Zum Schluss werden die kombinierten Unsicherheiten einer Differenzmessung bei unterschiedlichen Bedingungen in Anlehnung an [81] berechnet.

8.1 Analyse des Sondenmesssystems

Durch die Kalibrierung der weg- und winkelproportionalen Ausgangssignale des Sondenmesssystems des LiAFM mit dem z -Interferometer der NMM-1 werden solche systematischen Einflüsse wie die Einbaulage des LiAFM bzw. Anordnung des Messstrahls des Sondenmesssystems nicht parallel zur z -Achse der NMM-1, Winkeljustage des Referenzspiegels, Defokussierung, Strahlausbreitung, Winkelabweichung des Messstrahls (während der Messung), Einbaulage und Ausrichtung des PSD, Winkeljustage des Umlenkspiegels (vgl. Abschnitt 6.1, S. 55) sowie Justage der Sonde berücksichtigt. Weitere wesentliche Einflüsse wie Umweltabhängigkeit der interferometrischen Messung, Temperatur-, Feuchteabhängigkeit und Langzeitstabilität des mechanischen Aufbaus werden im Folgenden analysiert.

Die Laserwellenlänge dient im Interferometer als ein Maßstab. Die Wellenlängenstabilität eines unstabilisierten He-Ne-Lasers beträgt $\Delta\lambda_0/\lambda = \pm 3 \cdot 10^{-7}$ [107]. Die Wellenlänge λ des He-Ne-Lasers in Luft ist von der Vakuumwellenlänge $\lambda_0 = 632,991\,234\text{ nm}$, Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in Luft c und in Vakuum c_0 bzw. von der Brechzahl n der Luft abhängig:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{c}{c_0} = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (8.1)$$

Die Brechzahl der Luft n hängt von den Umweltparametern Lufttemperatur ϑ , -druck p , -feuchte RH und CO₂-Gehalt x_{CO_2} ab. Die Brechzahl der Luft kann mit Hilfe der empirischen Edlén-Formel berechnet werden. Die Brechzahlberechnung in der NMM-1 beruht auf den durch G. Bönsch und E. Potulski modifizierten Gleichungen [22, 81]. Die Berechnungsgleichungen sind im Anhang G, S. 169 dargestellt. Die Brechzahl wird per-

manent nach der Erfassung von Umweltdaten (Temperatur, Druck, Feuchte) ermittelt und zur Aktualisierung der Wellenlänge den He-Ne-Lasern der NMM-1 benutzt. In der Schwingungsmesskarte SM-04 der Interferometereinheit des LiAFM (vgl. Abschnitt 7.2, S. 67) wird während der Bestimmung der Längeninformation aus den normierten \cos - S_{\cos} und \sin - S_{\sin} Interferometersignalen eine feste Wellenlänge unter Normalbedingungen $\lambda_{\text{norm}} = 632,8 \text{ nm}$ [205] eingesetzt. Somit werden die umweltbedingten Änderungen der Wellenlänge des He-Ne-Lasers während der Messung nicht berücksichtigt. Während des Kalibriervorganges des wegproportionalen Signals (vgl. Abschnitt 7.3, S. 73) dient die aktuell berechnete Wellenlänge des z -Interferometers, unter Berücksichtigung der momentanen Umweltparameter, als Maßstab.

Unter Laborbedingungen an der TU Ilmenau kann man während der Langstrecken- und Langzeitmessungen mit folgenden Umweltparametern und den daraus resultierenden relativen Brechzahl- bzw. Wellenlängenschwankungen rechnen:

$$\begin{aligned} \vartheta &= 20^\circ\text{C} \pm 1 \text{ K ohne Temperierung,} & \frac{\Delta n}{n} &= \pm 1,0 \cdot 10^{-6}, \\ \vartheta &= 20^\circ\text{C} \pm 10 \text{ mK mit Temperierung,} & \frac{\Delta n}{n} &= \pm 1,0 \cdot 10^{-8}, \\ p &= 95\,030 \text{ Pa} \pm 1000 \text{ Pa,} & \frac{\Delta n}{n} &= \pm 2,7 \cdot 10^{-6}, \\ \text{RH} &= 50 \% \pm 5 \%, & \frac{\Delta n}{n} &= \pm 4 \cdot 10^{-8}. \end{aligned}$$

Das Interferometer des LiAFM ist so aufgebaut, dass geometrische Längen des Mess- und Referenzarms gleich sind. Im Messarm befinden sich allerdings zusätzlich ein neutraler Strahlteiler (NT) und die Fokussierlinse (vgl. Abbildung 5.18, S. 52). Dadurch verkürzt sich die Luftstrecke im Messarm um 13 mm. Die Änderung der Luftstrecke durch die schräge Anordnung der $\lambda/4$ -Platte im Messarm ist vernachlässigbar. Die Brechzahländerung und somit die Wellenlängenänderung führt bei ungleichen optischen Wegen im Mess- und Referenzarm zur Veränderung des Zählerstandes bzw. des Demodulationswertes, auch wenn die Positionen des Mess- und Referenzspiegels sich nicht verändert haben. Der optische Gangunterschied zwischen Mess- und Referenzarm beim Nullen der Interferometerzähler wird als Totstrecke bezeichnet [189]. Die Berechnung der Messlänge $l_{\text{m,k}}(t)$ zum beliebigen Zeitpunkt t unter Berücksichtigung der Totstrecke l_t und unter Annahme der Homogenität der Umweltparameter kann nach der in [81] und [139] hergeleiteten Gleichung erfolgen. Betrachtet man die Vorzeichendefinition¹³ im Interferometer des Sondenmesssystems und die Lage der Totstrecke im Messarm (vgl. Abbildung 8.1), erhält man die folgende Gleichung für die Messlänge $l_{\text{m,k}}(t)$ (vgl. Anhang H, S. 171):

$$l_{\text{m,k}}(t) = \frac{\lambda_0}{2k_{\text{TF}}n(t)}N(t) + \overbrace{\left(\frac{n(0)}{n(t)} - 1\right)}^{l_{\text{m,l}}(t)}l_t. \quad (8.2)$$

¹³Das Vorzeichen im Interferometer des Sondenmesssystems ist so definiert, dass die Verschiebung des Messspiegels bzw. des *Cantilevers* zum Strahlteilungspunkt zur Änderung der Interferometeranzeige in positiver Richtung führt. Die Vorzeichendefinition bei den Interferometern der NMM-1 ist der entgegengesetzt.

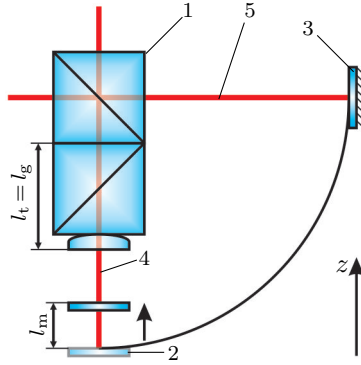


Abbildung 8.1: Totstrecke (1 PT, 2 *Cantilever* bzw. Messspiegel, 3 Referenzspiegel, 4 Messstrahl, 5 Referenzstrahl)

Setzt man die für die Laborbedingungen an der TU Ilmenau möglichen maximal entgegengesetzte Werte der Umweltparameter, so ergeben sich die, durch die Totstrecke verursachten, Abweichungen:

$$\begin{aligned}
 \vartheta &= 20^\circ\text{C} \pm 1\text{ K ohne Temperierung,} & l_{m,l} &= \pm 11,7\text{ nm,} \\
 \vartheta &= 20^\circ\text{C} \pm 10\text{ mK mit Temperierung,} & l_{m,l} &= \pm 0,1\text{ nm,} \\
 p &= 95\,030\text{ Pa} \pm 1000\text{ Pa,} & l_{m,l} &= \pm 35,0\text{ nm,} \\
 \text{RH} &= 50\% \pm 5\%, & l_{m,l} &= \pm 0,6\text{ nm.}
 \end{aligned}$$

Die Längenabweichungen $l_{m,l}(t)$ hängen von der Totstrecke l_t , der Brechzahl $n(0)$ beim Nullen des Zählers der Schwingungsmesskarte SM-04 (vor Kalibrierung (vgl. Abschnitt 7.2, S. 67) oder am Anfang einer Messung) und der aktuellen Brechzahl $n(t)$ (vgl. Gleichung (8.2)) ab.

Zu weiteren Längenabweichungen $l_{m,g}(t)$ führen durch Temperaturschwankungen bedingte Änderungen der Glasstrecken des NT und der Fokussierlinse sowie die Temperaturabhängigkeit der Brechzahl des optischen Glases $n_{BK7}(t)$ (vgl. Anhang G, S. 169). Die Änderung der Interferometeranzeige bei einem Temperatursprung $\Delta\vartheta = \vartheta(t) - \vartheta(0)$ hängt von der Länge der Glasstrecke $l_g = l_t$ selbst, dem Ausdehnungskoeffizienten des Glases α_{BK7} ¹⁴ sowie Glas- $n_{BK7}(t)$ ¹⁵ und Luftbrechzahlen $n(t)$ ab (vgl. Anhang H, S. 171):

$$l_{m,g}(t) = \overbrace{\alpha_{BK7} \Delta\vartheta \left(\frac{n_{BK7}(t)}{n(t)} - 1 \right) l_g}^{\text{Ausdehnung des Glases}} + \overbrace{\left(\frac{n_{BK7}(t) - n_{BK7}(0)}{n(t)} \right) l_g}^{\text{Brechzahländerung des Glases}}. \quad (8.3)$$

Die für die Laborbedingungen übliche Temperaturschwankungen führen zu folgenden Abweichungen:

$$\begin{aligned}
 \vartheta &= 20^\circ\text{C} \pm 1\text{ K ohne Temperierung,} & l_{m,g} &= \pm(47,5 + 16,7)\text{ nm,} \\
 \vartheta &= 20^\circ\text{C} \pm 10\text{ mK mit Temperierung,} & l_{m,g} &= \pm(0,5 + 0,2)\text{ nm.}
 \end{aligned}$$

¹⁴ $\alpha_{BK7} = 7,1 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$.

¹⁵ $n_{BK7}(\vartheta_{\text{norm}}) = 1,51509$.

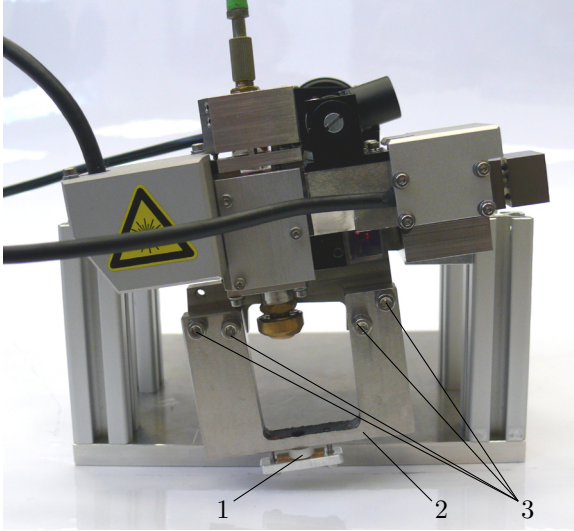


Abbildung 8.2: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Sondenmesssystems (1 Messspiegel, 2 rahmenartige Halterung des Messspiegels, 3 Stahlschrauben)

Die durch die Glasstrecke verursachten Längenabweichungen $l_{m,g}(t)$ können durch die Erweiterung der Gleichung (8.2) berücksichtigt werden:

$$l_{m,k}(t) = \frac{\lambda_0}{2k_{TF}n(t)} N(t) + l_{m,l}(t) + l_{m,g}(t). \quad (8.4)$$

Die Länge der Totstrecke l_t im Sondenmesssystem wird durch die Position des Messspiegels bzw. des *Cantilevers* beim Nullen des Interferometerzählers beeinflusst. Betrachtet man die Justage des *Cantilevers* in alle Richtungen (vgl. Abschnitt 6.2, S. 58) sowie die Fertigungstoleranzen mechanischer und optischer Bauelemente, so ist die Totstrecke auf ± 1 mm bekannt. Setzt man die für das Labor maximal entgegengesetzte Umgebungswerte, so ergeben sich daraus maximale Abweichungen der Totstreckenkorrekturen:

$\vartheta = 20^\circ\text{C} \pm 1\text{ K},$	$\Delta l_t = \pm 1\text{ mm},$	$\Delta l_{m,l} = \pm 0,9\text{ nm},$	$\Delta l_{m,g} = \pm(3,7 + 1,3)\text{ nm},$
$\vartheta = 20^\circ\text{C} \pm 10\text{ mK},$	$\Delta l_t = \pm 1\text{ mm},$	$\Delta l_{m,l} = \pm 0,01\text{ nm},$	$\Delta l_{m,g} = \pm(0,04 + 0,01)\text{ nm},$
$p = 95\,030\text{ Pa} \pm 1000\text{ Pa},$	$\Delta l_t = \pm 1\text{ mm},$	$\Delta l_{m,l} = \pm 2,7\text{ nm},$	
$\text{RH} = 50\% \pm 5\%,$	$\Delta l_t = \pm 1\text{ mm},$	$\Delta l_{m,l} = \pm 0,04\text{ nm}.$	

Zur Überprüfung der Totstreckenkorrekturen $l_{m,l}(t)$ und $l_{m,g}(t)$ wurden empirische Untersuchungen des Sondenmesssystems durchgeführt. Die Sondaufnahme wurde durch einen Messspiegel (1) ersetzt (vgl. Abbildung 8.2). Der Messspiegel wurde an einem speziellen Halter (2), der aus Invar 36[®] besteht, geklemmt (vgl. Abbildung 8.2). Die geometrischen Längen des Mess- und Referenzarms blieben dabei unverändert. Zuerst wurde die Angabe des Umrechnungsfaktors bzw. des Messbereichsfaktors $k_{\text{SM-04}}$ der Schwingungsmesskarte SM-04 [205] überprüft. Dazu wurden die cos- S_{\cos} und sin- S_{\sin} Interferometersignale und das wegproportionale Signal $S_{\text{SM-04}}$ mittels eines Messdatenerfassungssystems 34970A der Firma *Agilent Technologies* kontinuierlich aufgenommen, in Messlänge umgerechnet und in Abbildung 8.3 gegenübergestellt.

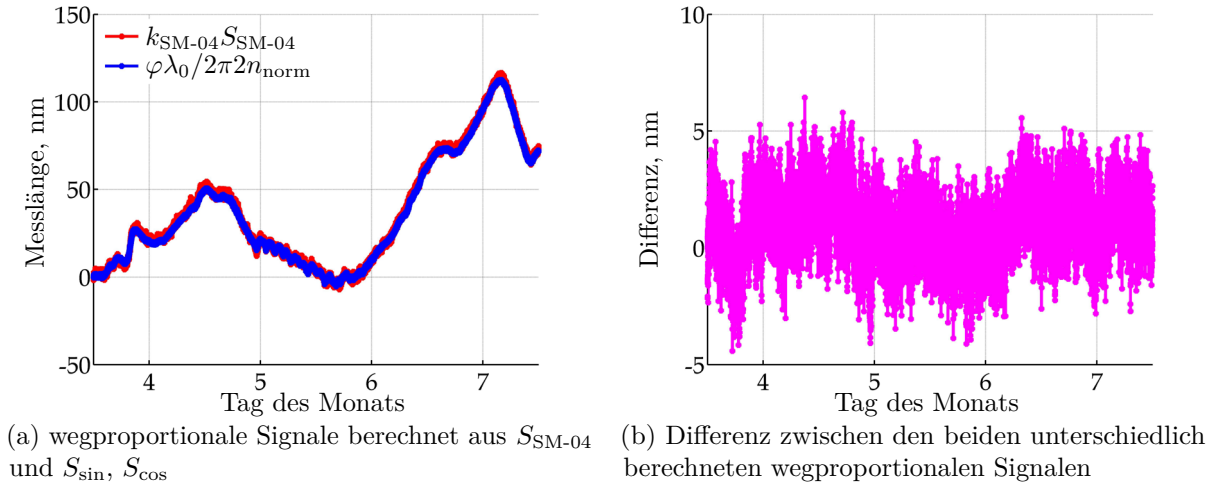


Abbildung 8.3: Vergleich der Berechnungen des wegproportionalen Signals

Die Umrechnung des wegproportionalen Signals S_{SM-04} in Messlänge $l_{m,k}(t)$ unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen bzw. der aktuellen Luftbrechzahl $n(t)$ und Totstreckenkorrektur $l_{m,l}(t)$ und $l_{m,g}(t)$ kann nach folgender Gleichung (8.5) ablaufen:

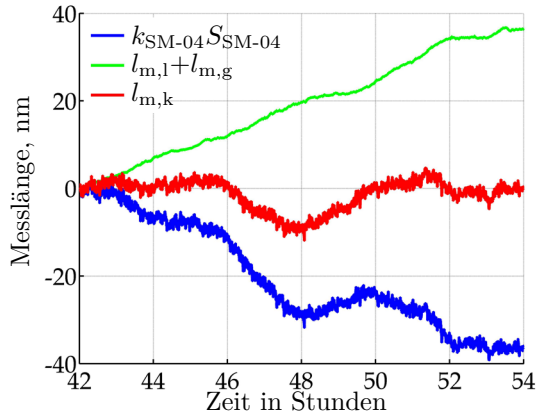
$$l_{m,k}(t) = \frac{k_{SM-04} S_{SM-04}(t) \lambda_0}{\lambda_{norm} n(t)} + l_{m,l}(t) + l_{m,g}(t). \quad (8.5)$$

Weiter wurde die Langzeitstabilität und die Umwelt- bzw. Temperaturabhängigkeit des Sondenmesssystems in einer Klimakammer untersucht. Zusätzlich zum wegproportionalen Signal S_{SM-04} (vgl. Abbildung 8.4(a)) wurden Biegungs- S_y und Torsionssignale S_x (vgl. Abbildung 8.4(c)), Summensignal (vgl. Abbildung 8.4(e)) sowie Temperatur ϑ (vgl. Abbildung 8.4(b)), Luftfeuchte RH (vgl. Abbildung 8.4(d)) und Druck p (vgl. Abbildung 8.4(f)) aufgezeichnet. Die Temperatur in der Klimakammer wurde mit Hilfe eines Kälte-Umwälzthermostates geregelt und die Luftfeuchte mittels Silicagel stabilisiert. Die erreichte Temperatur- und Feuchtestabilität über 12 Stunden betragen entsprechend ± 10 mK und $\pm 0,5$ %. Die Sondenmesssystemsignale zeigten im betrachteten Zeitraum keine ausgeprägte Drift. Die beiden Biegungs- S_y und Torsionssignale S_x korrelieren mit dem Summensignal der Winkelmesskarte PSD-03 (vgl. Abbildungen 8.4(c) und (e)). Das Summensignal ist proportional zur auf den PSD gelangten Strahlintensität und somit auch zur Lichtleistung des Lasers. Der Verlauf der aufgezeichneten Biegungs- und Torsionssignale kann auf Schwankungen der Laserleistung zurückgeführt werden.

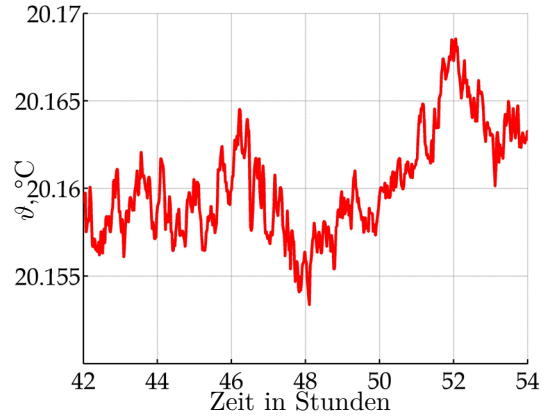
Die Langzeitstabilität der Signale des Sondenmesssystems kann durch deren Schwankungsbereich (*peak-to-valley* bzw. Spitze-Tal-Werte) und Standardabweichung beschrieben werden:

$$\begin{aligned} l_{m,k} : & \pm 10 \text{ nm}, \quad s(l_{m,k}) = 3,5 \text{ nm}, \\ S_x : & \pm 15 \text{ mV}, \quad s(S_x) = 10 \text{ mV}, \\ S_y : & \pm 50 \text{ mV}, \quad s(S_y) = 25 \text{ mV}. \end{aligned}$$

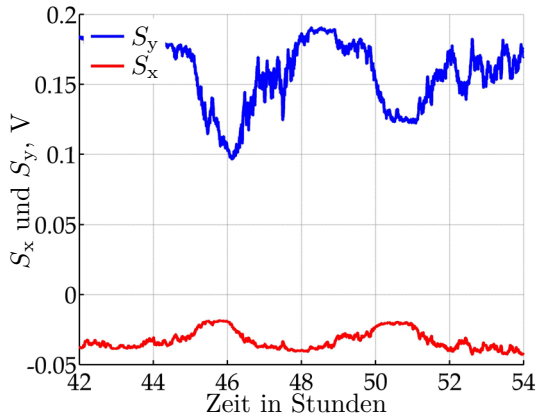
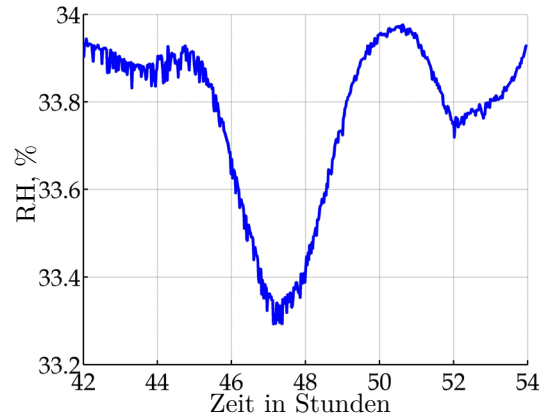
Um die Temperaturabhängigkeit des Sondenmesssystems zu bestimmen wurde es Temperaturschwankungen von 15°C bis 25°C ausgesetzt (vgl. Abbildung 8.5(b)). Dabei



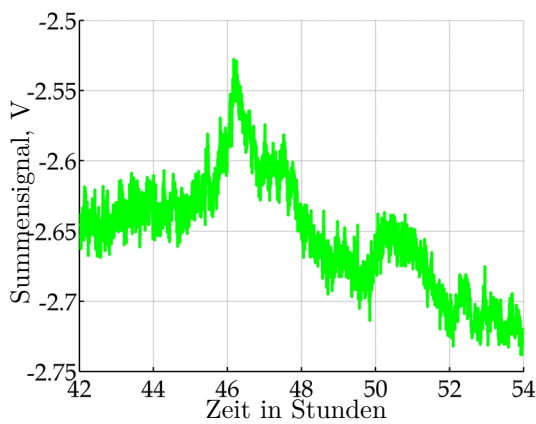
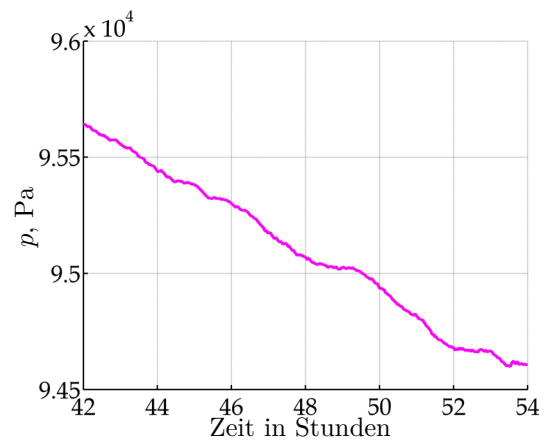
(a) wegproportionales Signal SM-04



(b) Temperatur

(c) Biegungs- S_y und Torsionssignale S_x 

(d) Luftfeuchte

(e) Summensignal $\propto I_A + I_B + I_C + I_D$
(vgl. Gleichung (5.11), S. 47)

(f) Luftdruck

Abbildung 8.4: Untersuchung der Langzeitstabilität des Sondenmesssystems

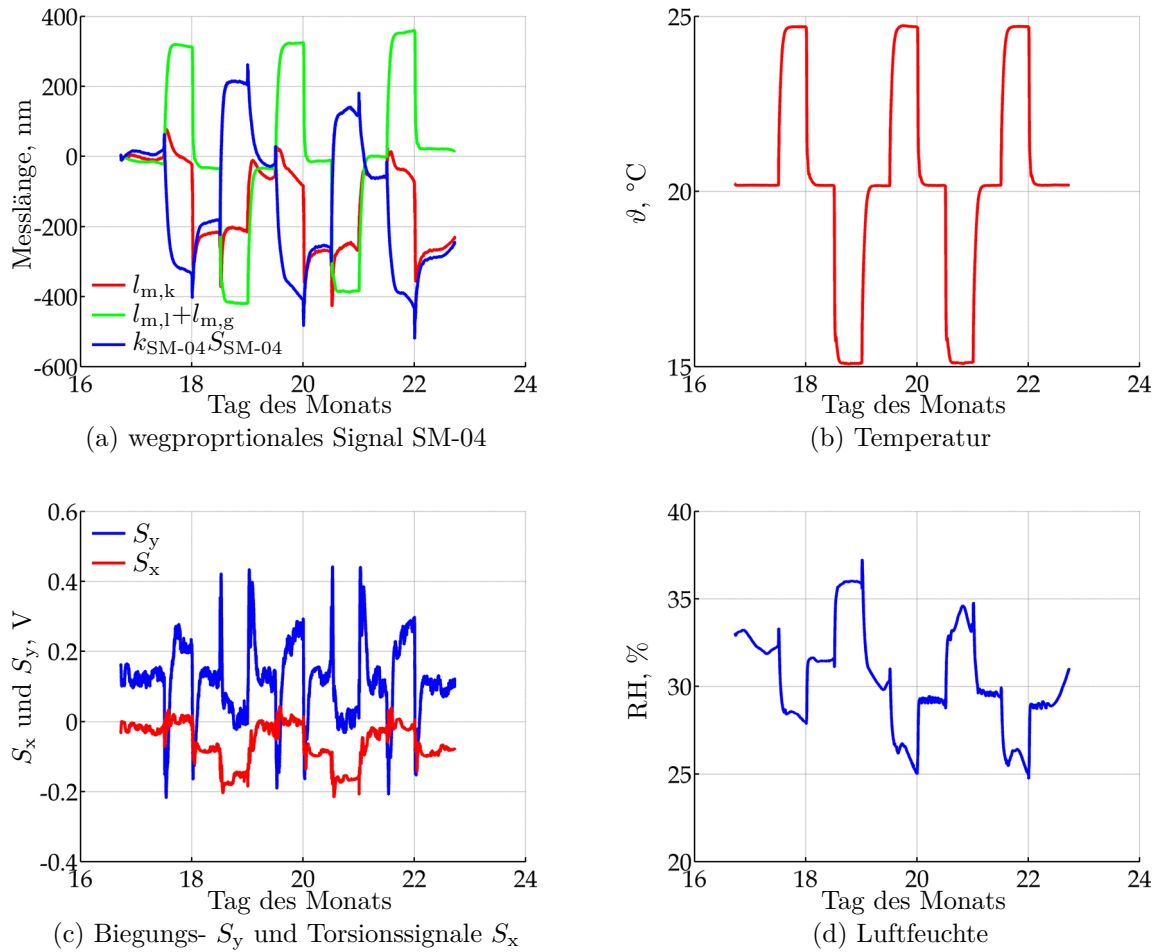


Abbildung 8.5: Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Sondenmesssystems

wurde jede Temperaturstufe für 12 Stunden stabil gehalten. In Abbildung 8.5(a) ist das nach Gleichung (8.5) korrigierte Interferometersignal $l_{m,k}(t)$ dargestellt. Eine Ursache für die in Abbildung 8.5(a) deutlich erkennbare Drift ist das verschiedene thermische Ausdehnungsverhalten von Mess- und Referenzarm aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Anordnungen. Der Referenzarm ist monolithisch aufgebaut und ist ein Teil des Invargrundkörpers (vgl. Abschnitt 6.1, S. 55). Nur die Gewindestifte im Einkörpergelenk des Referenzarms sind aus Stahl gefertigt. Diese Gewindestifte sind aus Platzgründen unsymmetrisch bezüglich des Referenzspiegels angeordnet. Die größere thermische Ausdehnung dieser Stahlstifte gegenüber des Einkörpergelenks während des Temperatursprung kann zu Verkippungen des Referenzspiegels führen. Auf dem Referenzarm ist eine zusätzliche Wärmequelle – die Leiterkarte mit dem PSD angebracht. Die rahmenartige Invarhalterung des Messspiegels ist mittels Stahlschrauben am Invargrundkörper fixiert (vgl. Abbildung 8.2). Somit kann die Temperaturveränderung auch zu Verkippungen des Messspiegels führen. Während der sprungförmigen Temperaturänderungen schwankte auch die Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer (vgl. Abbildung 8.5(d)). Die Feuchteänderungen beeinflussen insbesondere die Klebeverbindungen im Sondenmesssystem (Befestigung der Fokussierlinse und $\lambda/4$ -Platte). Die Temperatur- und Feuchteabhängigkeiten des Aufbaus

und dessen Klebeverbindungen können zu Änderungen der Signale des Sondenmesssystems führen. Es existiert kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Drift des korrigierten Wegsignals und der Temperaturänderung (vgl. Abbildung 8.5(a)). Die Temperaturabhängigkeit der Positionsmessung (bzw. des Interferometersignals) kann jedoch mit ca. 30 nm/K abgeschätzt werden [225]. Die beiden Torsions- S_x und Biegunssignale S_y weisen ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit von ca. 20 mV/K (vgl. Abbildung 8.5(c)) auf [225]. Eine der Ursachen für die temperaturabhängige Drift bei den Signalen sind die oben erwähnten Verkipnungen des Messspiegels. Auch kann der Aufbau der Justagevorrichtung des PSD (vgl. Abbildungen 6.1 und 6.2(c), S. 56) zu einer temperaturabhängigen Drift führen. Das Umlenkprisma wurde in die Justagevorrichtung eingeklebt. Thermisch- und feuchtebedingtes Quellverhalten der Kleberschicht kann die Verschiebungen und Verkipnungen des Umlenkprismas bewirken und somit zu Verlagerungen des Messstrahls auf dem PSD führen [9]. Die Justagevorrichtung mit dem Umlenkprisma ist mittels V-Nut-Kugel-Paarung, zwei Zugfedern und zwei Einstellschrauben mit dem Grundkörper des Sondenmesssystems verbunden (vgl. Abschnitt 6.1, S. 55). Die Einstellschrauben und Kugel sind aus Stahl gefertigt. Die unterschiedliche thermische Ausdehnung dieser Bauteile während des Temperatursprunges kann zu Verkipnungen des Umlenkspiegels und einer zusätzlichen Verlagerung des Messstrahls führen. Im nächsten Abschnitt wird die Langzeitstabilität und Umweltabhängigkeit des gesamten LiAFM inklusive der Sondenaufnahme betrachtet, analysiert und mit den hier erzielten Ergebnissen verglichen.

8.2 Charakterisierung des Gesamtsystems

Die Kenntnis der Ursachen der Längenmessabweichungen sowie der Langzeitstabilität und der Umweltabhängigkeit des Sondenmesssystems des LiAFM bilden die Basis für die Untersuchungen der messtechnischen Eigenschaften des Gesamtsystems. Es wurden neben der Langzeitstabilität und Umweltabhängigkeit unter anderem auch Rauschen, Stabilität der Kennlinien und Form der Antastspitze sowie zum Abschluss die kombinierte Messunsicherheit betrachtet. Teilergebnisse der Untersuchungen der messtechnischen Eigenschaften und der Messunsicherheitsanalyse des LiAFM wurden veröffentlicht in [225].

8.2.1 Umweltabhängigkeit

Die Umweltabhängigkeit des LiAFM (inklusive der Sondenaufnahme) wurde in einer Klimakammer untersucht. Wie bei der Untersuchung des Sondenmesssystems im vorherigen Abschnitt (vgl. Abbildung 8.5, S. 87) wurde das LiAFM Temperaturschwankungen von 15 °C bis 25 °C ausgesetzt (vgl. Abbildung 8.6). In den Abbildungen 8.6 (a) und (c) sind das nach Gleichung (8.5) korrigierte Interferometersignal $l_{m,k}(t)$ sowie die Torsions- S_x und Biegunssignale S_y dargestellt. Die Temperaturabhängigkeit des Interferometersignals des LiAFM beträgt ca. 250 nm/K [225]. In kommerziellen Geräten kann die Temperaturabhängigkeit in vertikaler Antastrichtung von mehreren hundert nm/K bis zu einigen $\mu\text{m/K}$ betragen [7, 142]. Die Temperaturabhängigkeit der Torsions- S_x und Biegunssignale S_y

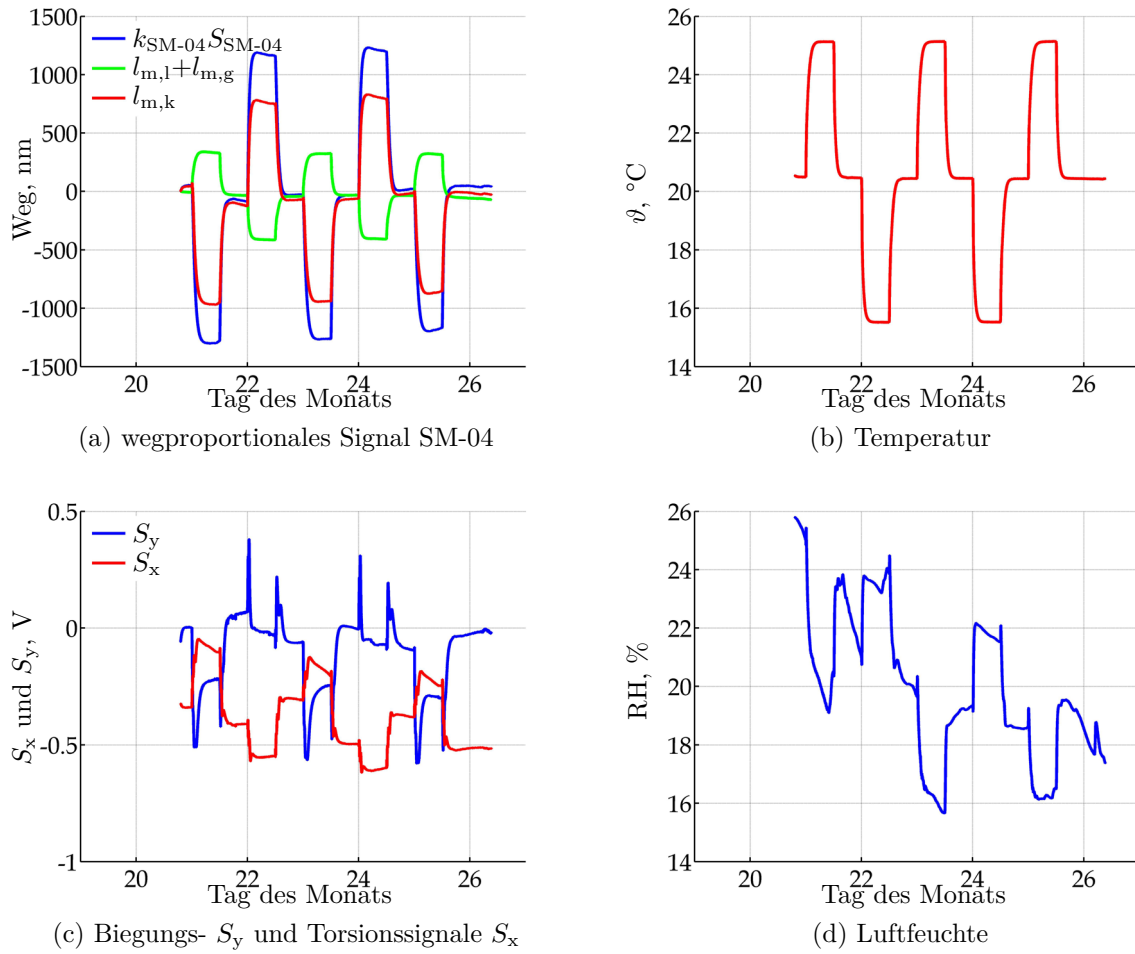


Abbildung 8.6: Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des LiAFM

kann mit ca. 40 mV/K abgeschätzt werden (vgl. Abbildung 8.6(c)) [225]. Die Ergebnisse zeigen die erwartete deutlich höhere Temperaturabhängigkeit des LiAFM gegenüber dessen Sondenmesssystems (vgl. Abbildung 8.5, S. 87). Der größte Beitrag zur Temperaturabhängigkeit des LiAFM entsteht durch die Sondenhalterung in der Sondenaufnahme (vgl. Abschnitt 6.2, S. 58). In der Sondenaufnahme werden mehrere unterschiedliche Materialien mit verschiedenen thermischen Ausdehnungsverhalten und Feuchteabhängigkeiten eingesetzt. In der Sondenhalterung (vgl. Abbildung 6.9, S. 61) wurden aus Platzgründen hauptsächlich Klebeverbindungen verwendet. Die Feuchteaufnahme von Klebstoffen führt zum Quellen der Klebeverbindungen, die zudem Zugbelastungen ausgesetzt sind. Eine geeignete Maßnahme ist die Konstanthaltung der Luftfeuchtigkeit mittels Silicagel [90].

8.2.2 Signalauschen

Die analogen Signale des LiAFM sind an die 16-Bit-A/D-Wandler der DSP-Einheit der NMM-1 angeschlossen (vgl. Abschnitt 7.2, S. 67). Zuerst wurden Rauschmessungen mit kurzgeschlossenen Eingängen der A/D-Wandler der DSP-Einheit über einen Zeitraum von 3 s durchgeführt. Bei der TMS320C31 DSP konnte eine mittlere Standardabweichung von 0,8 Digit ermittelt werden und 1,9 Digit bei der TMS320C6713B DSP. Nachfolgend wurde

	Amplitude ¹⁶ , nm	Biegung S_y , nm	Position S_{SM-04} ¹⁷ , nm	Stellsignal APC, nm
ohne Kontakt	0,7	0,16	0,5	-
im Kontakt, ohne Antastregelung	0,6	0,28	0,4	-
im Kontakt, NMM-1 Antastregelung (passives Antastsystem)	0,6	0,24	0,5	-
im Kontakt, APC Antastregelung	0,7	0,7	0,5	0,6
im Kontakt, NMM-1 & APC Regelung (aktives Antastsystem)	0,7	0,7	0,4	0,6

Tabelle 8.1: Mittlere Standardabweichungen des Rauschens der Signale des LiAFM gemessen mit der DSP TMS320C31

das Signalrauschen des LiAFM bei frei hängender (ohne Kontakt mit der Messobjektoberfläche) sowie bei ausgelenkter Sonde mit und ohne Antastregelung über jeweils einen Zeitraum von 3 s mehrfach gemessen. In der Tabelle 8.1 sind die ermittelten Standardabweichungen des Signalrauschens zusammengefasst.

8.2.3 Stabilität der Kalibrierkennlinien

Aus der Vielzahl von nacheinander aufgenommenen Kalibrierkennlinien (vgl. Abschnitt 7.3, S. 73) können deren Linearität, Wiederholbarkeit der Kalibrierkoeffizienten sowie des berechneten Sollwertes *SetPoint* (oder eines beliebigen Messpunktes) und somit die Wiederholbarkeit der Antastung analysiert werden [225]. Der Kalibriervorgang des passiven und aktiven Tastsystems in beiden Betriebsarten (CM und IM) mit entsprechenden Antastspitzen wurde jeweils zweihundertmal wiederholt [79]. Auf jeder aufgenommenen Kennlinie wurde in einem festgelegten Abstand zum jeweiligen Bereich ohne Kontakt mit der Oberfläche des Messobjektes ein Arbeitsbereich definiert (vgl. Abbildungen 7.8–7.10, S. 76–80). Die Kalibrierkoeffizienten (vgl. Gleichung (7.4), S. 74) wurden jeweils auf zwei unterschiedliche Weisen ermittelt. Zum einen (a) wurde zu jeder Kennlinie innerhalb des definierten Arbeitsbereiches eine individuelle Ausgleichsgerade und somit Offset und Anstieg bzw. die Kalibrierkoeffizienten bestimmt. Folgend wurden die mittleren Kalibrierkoeffizienten, deren Standardabweichungen sowie mittlere Residuen (vgl. Gleichung (7.8), S. 74) aus Kalibrierkennlinien und deren -koeffizienten berechnet. Zum anderen (b) wurde eine einzige Ausgleichsgerade über alle Kalibrierkennlinien (entsprechendes Messsignals) berechnet und die Residuen aus Differenzen zwischen jeder einzelnen Kennlinie und der gemeinsamen Ausgleichsgerade ermittelt. Anschließend wurden die mittlere Residuen und deren Standardabweichungen bestimmt.

¹⁶Model 7280 DSP *lock-in-Amplifier* der Firma AMETEK GmbH.

¹⁷GAIN = 1, FILTER = 0.

			passives Tastsystem			aktives Tastsystem			
			CM		IM	CM		IM	
			Bie- gung	Positi- on ¹⁸	Ampli- tude ¹⁹	Positi- on	Stell- signal APC	Positi- on	Stell- signal APC
Offset, nm	\bar{x}	(a)	418,089	620,896	291,615	687,916	998,36	-84,557	1024,98
		(b)	418,090	620,897	291,615	687,916	998,36	-84,557	1024,98
	s	(a)	0,334	0,156	0,218	0,111	0,706	0,201	0,298
Anstieg, nm/Digit	\bar{x}	(a)	0,028	0,384	-0,040	0,290	-0,063	0,293	-0,063
		(b)	0,028	0,384	-0,040	0,290	-0,063	0,293	-0,063
	s	(a)	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Residuen, nm	\bar{x}	(a)	3,992	2,547	0,832	2,556	140,103	15,724	117,594
		(b)	3,995	2,550	0,834	2,556	140,103	15,725	117,594
	s	(a)	0,233	0,167	0,042	0,066	0,484	0,078	0,158
		(b)	0,233	0,166	0,042	0,066	0,484	0,078	0,158

Tabelle 8.2: Wiederholbarkeit der Kalibrierkennlinien repräsentiert durch Vergleich der Mittelwerte \bar{x} und der Standardabweichungen s der auf unterschiedlichen Weisen ermittelten Kalibrierkoeffizienten und Residuen

Die berechneten mittleren Kalibrierkoeffizienten und ermittelten Residuen stimmen nach beiden Methoden überein und deren Standardabweichungen sind kleiner als 0,5 nm (vgl. Tabelle 8.2). Das Kennlinienverhalten und somit der Anstieg bleiben im Verlauf der zweihundert Messungen für jedes Messsignal des LiAFM konstant. Vergleicht man die berechneten mittleren Polynomkoeffizienten (Offset und Anstieg) mit den Ergebnissen der Kalibrierungen aus den Tabellen 7.3 (S. 78) und 7.4 (S. 80), so sieht man, dass die Kennlinienanstiege übereinstimmen, obwohl es sich um völlig unterschiedliche Messungen mit anderen Antastspitzen handelt. Die Differenzen zwischen den Offsetwerten lassen sich durch Justage des *Cantilevers*, Ausrichtung des Nullpunktes des PSD, Nullen des

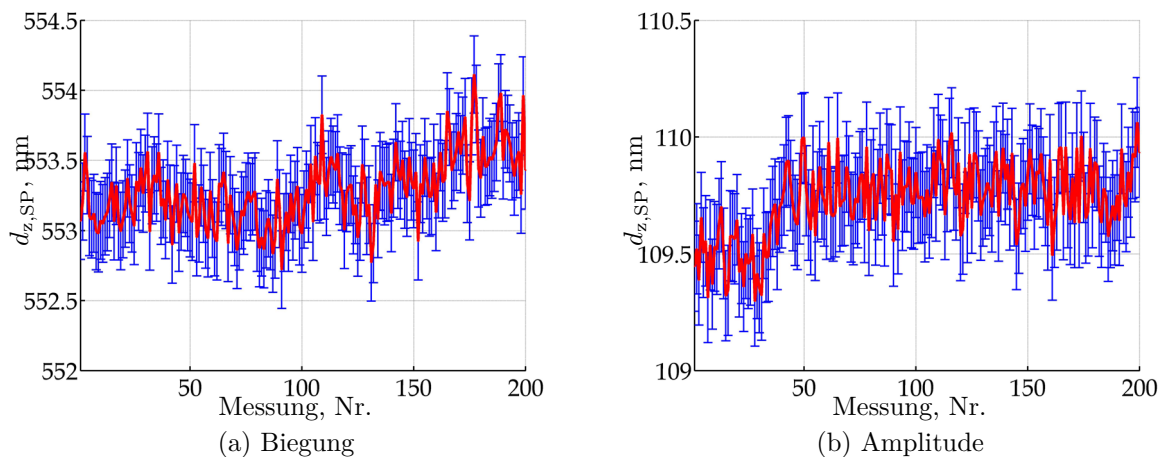


Abbildung 8.7: Die Sollwerte $d_{z,SP}$ und deren Unsicherheiten $u(d_{z,SP})$ ($k=2$)

¹⁸GAIN = 1, FILTER = 0.

¹⁹Model 7280 DSP *lock-in-Amplifier* der Firma AMETEK GmbH.

		passives Tastsystem			aktives Tastsystem			
		CM		IM	CM		IM	
		Bie- gung	Positi- on	Ampli- tude	Positi- on	Stell- signal APC	Positi- on	Stell- signal APC
Sollwert, nm	\bar{x}	553,282	577,468	109,726	1714,476	1549,591	1073,239	874,423
	s	0,248	0,159	0,162	0,110	0,468	0,156	0,140

Tabelle 8.3: Wiederholbarkeit der Sollpositionen

Zählers der Schwingungsmesskarte SM-04, Auswahl der Anregungsamplitude im IM sowie Definition des Arbeitsbereiches erklären. Lediglich die Offsetdrift der Messsignale beeinflusst während des Scans das Messergebnis. Der nachfolgende Abschnitt 8.2.4 widmet sich der Langzeitstabilität des LiAFM sowie den Driftuntersuchungen der Messsignale.

Anhand Tabelle 8.2 ist zu erkennen, dass die Linearitätsabweichungen des Stellsignals des APC deutlich größer sind als bei den Biegungs-, Amplituden- und Positionssignalen. Hauptursache für diesen Effekt ist das Hystereseverhalten des piezoelektrischen Antriebes. Das Stellsignal des APC spielt jedoch keine Rolle bei der Bestimmung des Messergebnisses (vgl. Abschnitt 8.2.7, S. 100).

Die Wiederholbarkeit des Sollwertes oder der Sollposition (bzw. eines beliebigen Messpunktes) kann anhand der für jede Kennlinie berechneten Kalibrierkoeffizienten (Methode (a)) bestimmt werden. Dabei werden die entsprechend vorgegebenen Werten $a_{i,SP}$ in Digit des Ausgangssignals des LiAFM eingesetzt. Exemplarisch, für die Berechnung des Sollwertes $d_{z,SP}$ des an den A/D-Kanal a_0 angeschlossenen Biegungssignals soll Gleichung (7.7), S. 74 eingesetzt werden. Die Standardabweichungen der Sollwerte über mehrere Messungen beschreiben ihre Wiederholbarkeit. Die ermittelten Standardabweichungen sind kleiner als 0,5 nm (vgl. Tabelle 8.3). In Abbildung 8.7 sind die Sollwerte der Biegung im CM bzw. Amplitude im IM der zweihundert unmittelbar aufeinanderfolgenden Messungen, exemplarisch für das passive Tastsystem, dargestellt. Die Unsicherheiten der Sollwerte können anhand folgender umgestellter und vereinfachter Gleichung nach [81] berechnet werden:

$$u^2(d_{z,SP}) = \frac{\left(\overline{a_i^2} - 2\overline{a_i}a_{i,SP} + a_{i,SP}^2\right) u^2(l_z)}{m \left(\overline{a_i^2} - \overline{a_i}^2\right)}. \quad (8.6)$$

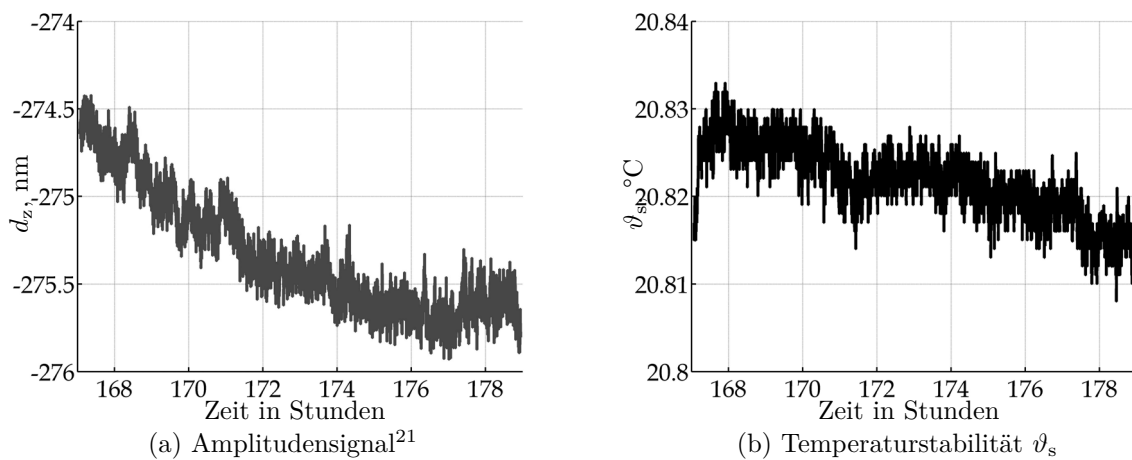
8.2.4 Langzeitstabilität

Die Langzeitstabilität des LiAFM, wie das Signalrauschen im vorherigen Abschnitt 8.2.2, wurde bei frei hängendem und bei dem ausgelenkten *Cantilever* (im Kontakt mit der Messobjektoberfläche) ohne und mit angeschalteter Antastregelung (passives Tastsystem) untersucht (vgl. Abbildungen 8.8–8.11). Die Ausgangssignale des LiAFM (Amplituden-, Biegungssignal und wegproportionales Signal SM-04) wurden jeweils über einen Zeitraum von 12 Stunden bei stabilen Messbedingungen (vgl. nächster Abschnitt 8.2.5) aufgezeichnet.

	IM		CM					
	Amplitude ²⁰		Biegung		Position		l_z	
	pv , nm	s , nm	pv , nm	s , nm	pv , nm	s , nm	pv , nm	s , nm
ohne Kontakt	1,5	0,3	3,25	0,7	7,20	2,14	-	-
im Kontakt, ohne Antastregelung			3,29	0,6	3,4	0,8	-	-
im Kontakt, NMM-1 Antastregelung	-	-	-	-	3,23	0,7	3,5	0,6

Tabelle 8.4: Langzeitstabilität des LiAFM über 12 Stunden

Die Langzeitstabilität des LiAFM kann als die Spitze-Tal-Werte pv und die Standardabweichungen s seiner Ausgangssignale über die Messzeit dargestellt werden (vgl. Tabelle 8.4). Die geringsten Schwankungen wurden bei dem Amplitudensignal (Betriebsart *Intermittent-Modus* (IM)) aufgezeichnet (vgl. Abbildung 8.8(a)). Die Standardabweichungen s und Spitze-Tal-Werte pv des Biegungssignals (Betriebsart *Contact-Modus* (CM)) belaufen sich entsprechend auf 0,7 nm und 3,3 nm (vgl. Abbildungen 8.9(a) und 8.10(a)) [225]. Die Schwankung des korrigierten wegproportionalen Signals SM-04 von 7,2 nm während der Langzeitmessung mit frei hängendem *Cantilever* kann anhand der Feuchteabhängigkeit der Klebeverbindungen der Sondenhalterung (vgl. Abschnitt 8.2.1, S. 88) erklärt werden. Bei der Messung im CM Betrieb mit eingeschalteter Antastregelung der NMM-1 wurden anstatt des konstanten Biegungssignals die z -Interferometerwerte der NMM-1 aufgenommen (vgl. Abbildung 8.11(a)). Die ermittelten Spitze-Tal-Werte pv und die Standardabweichungen s der z -Interferometersignals und korrigierten wegproportionalen Signals SM-04 entsprechen 3,5 nm und 0,7 nm.

Abbildung 8.8: Verhalten des Amplitudensignals (IM Betrieb) eines frei schwingenden *Cantilevers* (ohne Kontakt zur Messobjektoberfläche)²⁰HF2LI *lock-in*-Verstärker der Firma Zurich Instruments AG.²¹HF2LI *lock-in*-Verstärker der Firma Zurich Instruments AG.

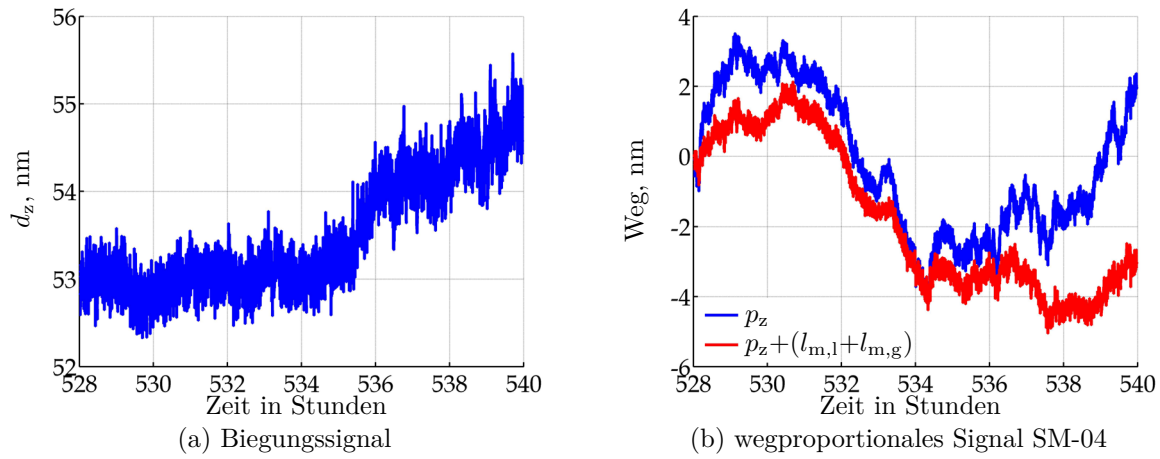


Abbildung 8.9: Verhalten der Biegungs- und wegproportionalen Signale (CM Betrieb) eines frei hängenden *Cantilevers* (ohne Kontakt zur Messobjektoberfläche)

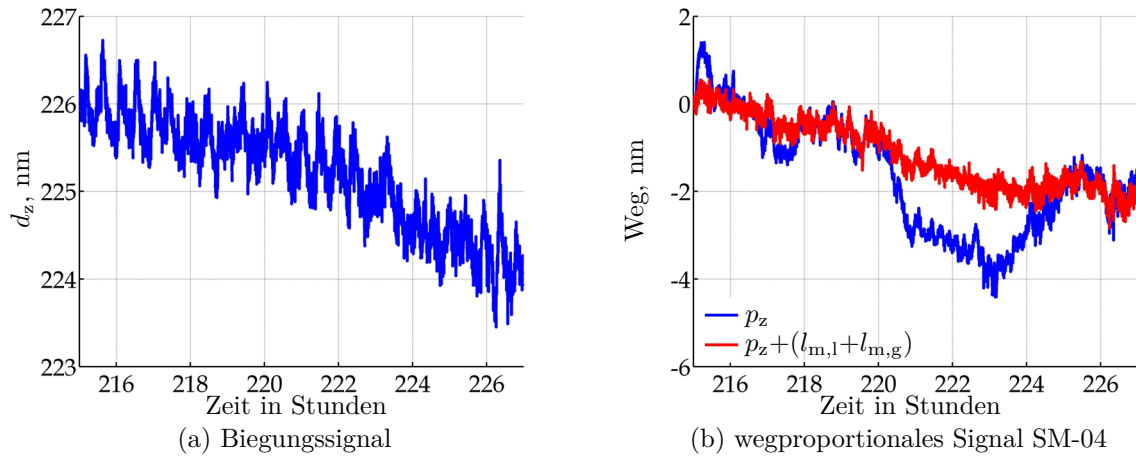


Abbildung 8.10: Verhalten der Biegungs- und wegproportionalen Signale (CM Betrieb) eines ausgelenkten *Cantilevers* (im Kontakt zur Messobjektoberfläche)

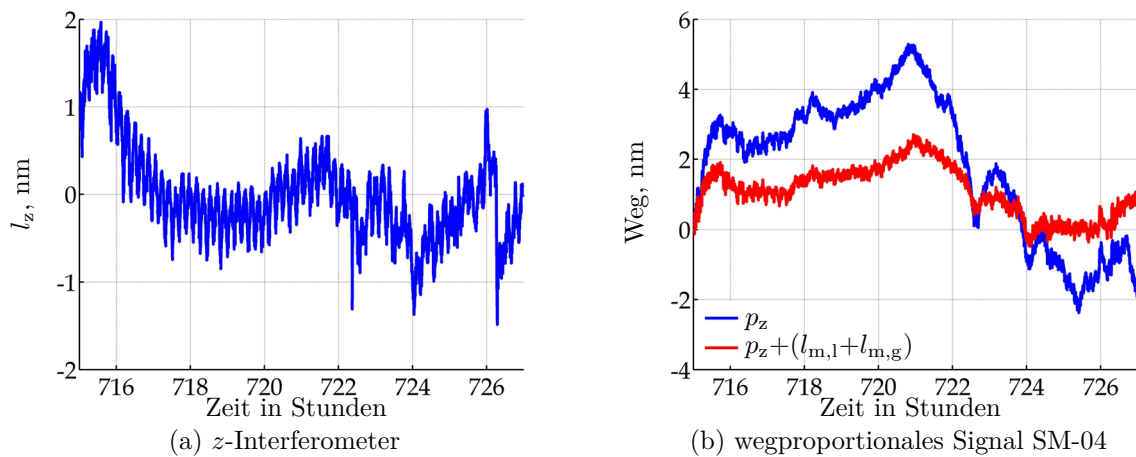


Abbildung 8.11: Signalverhalten bei eingeschalteter Antastregelung der NMM-1

8.2.5 Messbedingungen

Die Umgebungsbedingungen bzw. die Messbedingungen des Gesamtsystems (bestehend aus NMM-1 (1), vgl. Abbildung 8.12, Antastsystem LiAFM (2) und Messobjekt) beeinflussen die Messungen und somit auch die Messergebnisse. Zu den Umgebungsbedingungen gehören neben den Umweltbedingungen (Lufttemperatur, -feuchte und -druck) auch Schall, Vibrationen (Schwingungen und Erschütterungen) und Streulicht. Das Gesamtsystem befindet sich in einer Akustikhaube (3) mit einem integrierten pneumatischen Schwingungsisolierungstisch (4) [81]. Das Gestell (5) mit der Akustikhaube (3) wurde auf einem vom Gebäude entkoppelten speziellen schwingungs isolierten Fundament (6) aufgestellt (vgl. Abbildung 8.12). Für die Temperierung des Gesamtsystems wurden an den Innenwänden der Akustikhaube (3) Kupferplatten mit -rohren und Dämmatten (Temperierungsplatten (7)) befestigt. Das Temperierungssystem der Haube wurde an einem Kälte-Umwälzthermostat angeschlossen. Die Temperatur sowie weitere Umweltdaten können mittels eines Umweltdatenerfassungssystem 34970A der Firma *Agilent Technologies* oder der DSP-Einheit der NMM-1 kontinuierlich aufgenommen werden. Mehrere Temperatursensoren wurden in der Nähe der Interferometer der NMM-1, der Spiegelecke mit dem Messobjekt, der Sondenaufnahme, des Sondenmesssystems und des Kamerasystems des LiAFM angebracht. Die aufgenommenen Umweltdaten können zur Umwelt- und Totstreckenkorrektur des Interferometersignals des LiAFM eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 8.1, S. 81). Durch die Akustikhaube werden die Luftfeuchteänderungen im Innenraum der Haube im Vergleich zum Laborraum etwas gedämpft. Zur Stabilisierung der Luftfeuchte (in der Akustikhaube) kann Silicagel eingesetzt werden. Die Luftfeuchteabweichung über einen längeren Zeitraum kann in Abhängigkeit von den meteorologischen Gegebenheiten bis zu $\pm 5\%$ betragen. Die

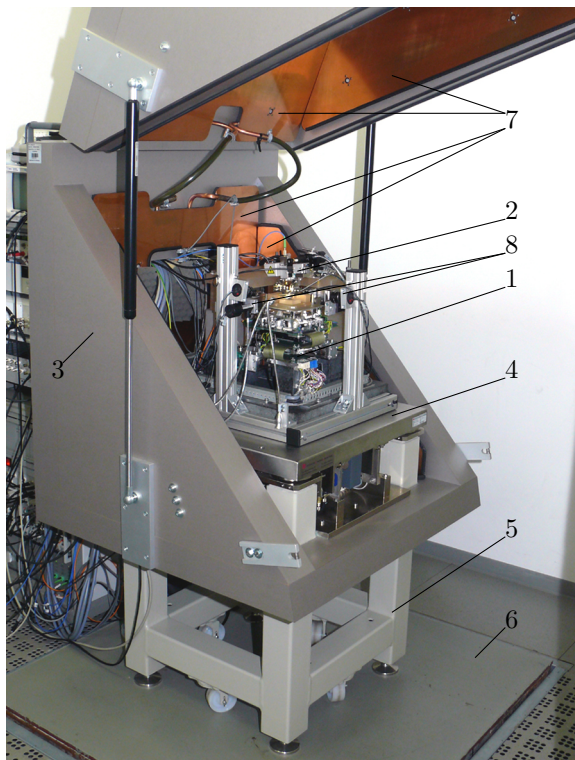


Abbildung 8.12: Messanordnung
(1 NMM-1, 2 LiAFM, 3 Akustikhaube,
4 Schwingungsisolierungstisch, 5 Gestell,
6 Fundament, 7 Temperierungsplatten,
8 Kamerasystem der NMM-1)

Temperaturstabilität in der Haube beläuft sich auf ± 10 mK. Solche hohe Temperaturstabilität ist nur bei geschlossener Akustikhaube, angeschalteter Temperierung, aktivierter Gewichtskraftkompensation der Spiegelecke der NMM-1 und statischen (unveränderbaren) Wärmequellen möglich. Somit darf während der Messung die Akustikhaube nicht geöffnet werden. Zur Überwachung der Messung können neben des Mikroskopkamarasystems des LiAFM (vgl. Abschnitt 6.3, S. 62) zusätzlich die Überblick- und Mikroskopkameras der NMM-1 (8) [81] benutzt werden. Nach einem Austausch oder Nachjustierung des *Cantilevers* und nachfolgendem Anschalten der Temperierung sind mindestens zwei Stunden Wartezeit notwendig, um die Temperaturstabilität von ± 10 mK [222] zu erreichen. Im Allgemeinen hängt die Wartezeit von den Umweltbedingungen (bei geöffneter Haube) im Labor ab und kann sich von den ermittelten Werten unterscheiden. Um über eine geeignete Startzeit der Messung entscheiden zu können, wird empfohlen die Umweltdaten und die Ausgangssignale des LiAFM während der Wartezeit aufzuzeichnen (vgl. Abbildung 8.13). Um nach Beginn des Messvorganges Temperaturänderungen zu vermeiden, sollte die Spiegelecke der NMM-1 während der Wartezeit entsprechend zum späteren Messablauf kontinuierlich bewegt werden.

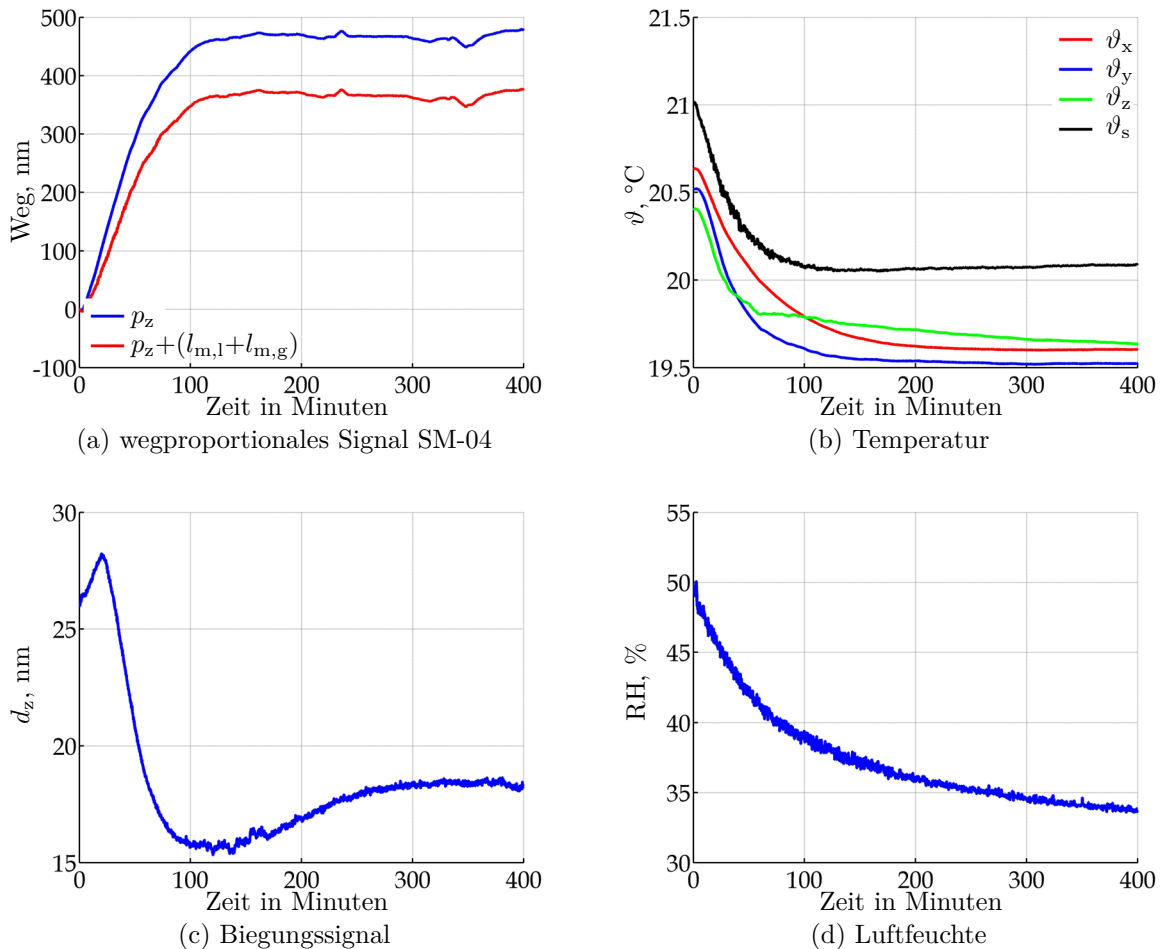


Abbildung 8.13: Verhalten nach einem Austausch und Nachjustierung des *Cantilevers*

8.2.6 Form des Tastelementes

Die Kenntnis über die Form der Antastspitze und deren Veränderung während der Messung ist für die Bestimmung der Oberflächeneigenschaften wie Rauheit oder Strukturweiten von großer Bedeutung. Die aufgezeichnete Oberfläche ergibt sich aus einer Faltung von Spitzenform und der realen tatsächlichen Oberfläche [134]. Die gemessenen Profile weisen größere Strukturreadien auf und werden geglättet, wenn die Antastspitze nicht in jede Rille gelangt (vgl. Abbildung 8.14). Somit ist die Auflösung der AFM-Messung durch die Antastspitze begrenzt. Ist die Spitzeengeometrie bekannt, so lässt sich die Oberflächengeometrie durch eine Entfaltung bis zu einem gewissen Maß wiederherstellen [24, 110]. Unterschiedliche Methoden und Charakterisierer zur Bestimmung der Spitzenform wurden in Tabelle 8.5 zusammengefasst. In Hinsicht auf Langstreckenmessungen (vgl. Abschnitt 9.3, S. 113) ist der TGT1²² Charakterisierer [222] für die Bestimmung der Spitzenform gut geeignet. Ein Scan einer Messobjektspitze des TGT1- Charakterisierers mit einem Messpunktabstand von 2 nm dauert ca. 15 min [118]. Zusätzlich kann der *blind tip estimation* oder BTE Algorithmus auf die Messdaten des TGT1 Scans angewendet werden. Dadurch erhält man ein 3D-Modell der Antastspitze, welches für eine Entfaltung der Messdaten genutzt werden kann. Der Vorteil dieser Charakterisierungsmethode liegt in der Genauigkeit der Rekonstruktion. Die ermittelten Spitzenprofile stimmen gut mit der jeweiligen REM-Aufnahmen der Antastspitze überein [118].

Die Veränderung der Spitzenform während des Antast- und Messvorganges wird neben dem Verschleiß (vgl. Abbildung 8.15(b)) auch durch Biegung (vgl. Abbildung 8.15(c)) und Stauchung (vgl. Abbildung 8.15(d)) der Antastspitze sowie Ansammlung von Schmutzpartikeln (vgl. Abbildung 8.15(e)) verursacht. Dadurch ist eine theoretische Beschreibung der Veränderung der Spitzenform bzw. Abnutzung der Spitze in Abhängigkeit von der Messstrecke erschwert. Im Rahmen eines EU Projektes wurden die Einflüsse verschiedener Parameter wie Messstrecke, Scangeschwindigkeit, Betriebsart (CM, IM), Messkraft (*SetPoint*), Beschichtung und Geometrie der Antastspitze auf ihre Abnutzung empirisch untersucht. Die Veränderung der Spitzenform wurde jeweils durch die Größen der aus den Spitzenrekonstruktionen ermittelten Radien in Abhängigkeit von der bereits zurückgelegten Messstrecke angegeben [118].

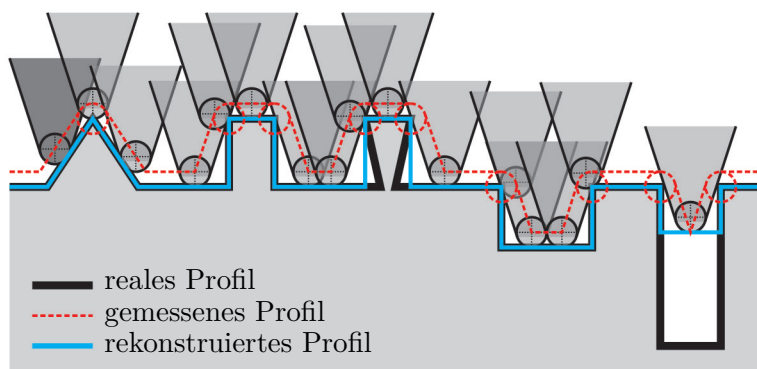


Abbildung 8.14: Prinzipskizze der Abbildung eines Oberflächenprofils mittels Antastspitze

²²Strukturbezeichnung.

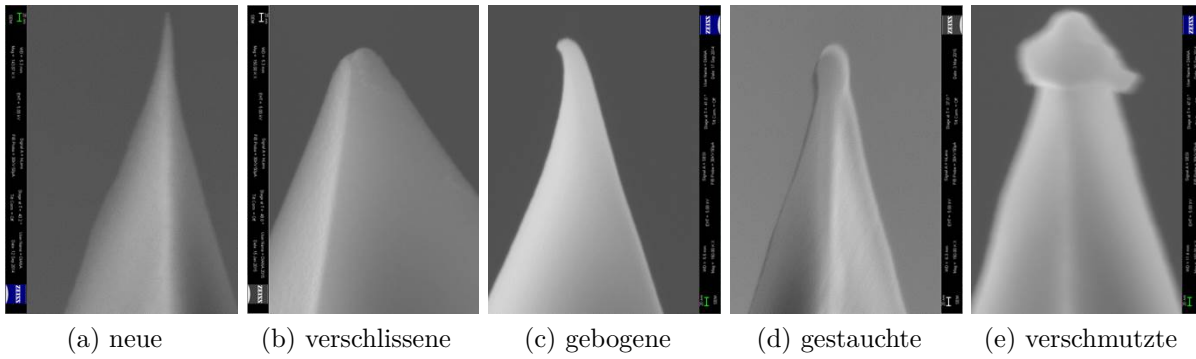
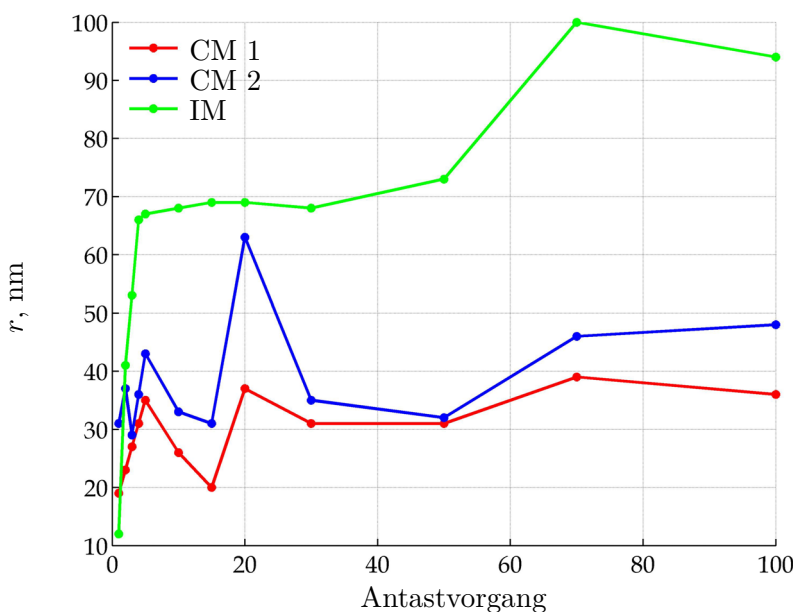


Abbildung 8.15: REM-Aufnahmen unterschiedlicher Antastspitzen

Bei der Auswahl von geeigneten Scanparametern in Hinsicht auf die Realisierung von hochauflösenden Langstreckenmessungen sollen die erzielten Untersuchungsergebnisse einbezogen werden. Z. B. führen wiederholte Antast²³- sowie Kalibriervorgänge zum Abstumpfen der Spitze (vgl. Abbildung 8.16), weshalb während der Messungen die Anzahl der Antastvorgänge möglichst gering zu halten ist und auf unnötige Kalibrierungen verzichtet werden sollte. Die Scangeschwindigkeit hat einen eher geringen Einfluss auf die Abnutzung der Antastspitze während der Messung an flachen Messobjekten (ohne Strukturen). Eine hohe Scangeschwindigkeit ($\geq 50 \mu\text{m/s}$) führt nicht automatisch zu einem höheren Verschleiß (vgl. Abbildung 8.17(a)). Eine Erhöhung der Geschwindigkeit kann zur Erhöhung der Regelabweichungen und somit zu Veränderungen der Messkraft während der Scans, insbesondere bei einer Oberfläche mit hohen Strukturen, führen, wodurch die Spitze beschädigt werden kann. Andererseits ruft die Reduzierung der Geschwindigkeit automatisch die Verlängerung der Messzeit und somit der Wechselwirkungszeit zwischen der Spitze und der Oberfläche hervor, was auch die Abnutzung der Spitze bewirken kann.

Abbildung 8.16: Veränderung des Spitzenradius in x - z -Ebene in Abhängigkeit von der Anzahl der Antastvorgänge:

CM 1 Messung in CM mit *SetPoint* von 125 nm,
 CM 2 Messung in CM mit *SetPoint* von 250 nm,
 IM Messung in IM mit *SetPoint* von 70 % der antastkraftfreien Schwingungsamplitude

²³engl. *approach* oder *landing*.

Weiterhin erfordert eine Messzeiterhöhung eine gute Langzeitstabilität des Gesamtsystems. Eine Messkrafterhöhung führt dazu, dass der Radius einer Antastspitze schneller ansteigt und auf einen größeren Wert hinausläuft. Daher sollte die Messkraft stets nur so hoch eingestellt werden, bis ein ausreichend sicherer Kontakt mit der Oberfläche erreicht wird (*SetPoint* befindet sich eher in der Nähe *ForceLower*). Die rekonstruierten Spitzenradien nach Messungen in den beiden Betriebsarten CM und IM zeigten nur geringe Unterschiede. Die Untersuchungen zum Einfluss der Eigenschaften der Antastspitze zeigten die Abhängigkeit des Verschleißes vom Material (bzw. Beschichtung) und Geometrie der Spitze (vgl. Abbildung 8.17(b)). Eine DLC-Schicht verringert eine Abnutzung der Spitze, es

Methode	Vorteile	Nachteile
REM-Aufnahme	<ul style="list-style-type: none"> reale hochauflösende 2D-Abbildung der Spitze 	<ul style="list-style-type: none"> hoher Aufwand durch Ausbau (aus AFM) und Einbau (in REM) der Spitze keine Spitzenformbestimmung während den AFM-Messungen möglich
kalibrierter Spitzen Charakterisierer [84, 85] (Supracon AG)	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung des Spitzenprofils in Scanrichtung anhand einzelner Scanlinie exakte Ausrichtung der Gitterlinien nicht notwendig (Linienbreiten < 800 nm) kalibrierte Linienbreite 	<ul style="list-style-type: none"> erschwerter Lokalisierung der Gitterstrukturen Bestimmung des Spitzenprofils nur in eine Richtung
TGX1 Kreuzgitter (NT-MDT Co.)	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Spitzenprofile in beiden Scanrichtungen anhand einzelner Scanlinien großes Messfeld mit identischen Strukturen 	<ul style="list-style-type: none"> Ausrichtung des Kreuzgitters erforderlich (Strukturbreiten ca. $1,5 \mu\text{m}$) unbekannten Strukturbreiten
TGT1 Feld mit scharfen Spitzen [29] (NT-MDT Co.)	<ul style="list-style-type: none"> 3D-Abbildung der Spitze großes Messfeld mit identischen Strukturen 	<ul style="list-style-type: none"> hochauflösender Flächenscan ($\geq 1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$) notwendig Spitzen des Charakterisierers beeinflussen die Ermittlung der Spitzenform
PA01 Nanostrukturen [133, 134] (MikroMasch)	<ul style="list-style-type: none"> 3D-Schätzung²⁴ der Spitze großes Messfeld mit zufälligen Nanostrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> hochauflösender Flächenscan ($\geq 2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ [118]) notwendig Spitzenabschätzung nur bis zu einer Höhe < 60 nm möglich [118] geeignet nur für Messspitzen mit kleinen Radien ($r < 20$ nm)

Tabelle 8.5: Methoden zur Bestimmung der Spitzenform

²⁴Die Spitze kann durch einen computergestützten Algorithmus *blind tip estimation* oder BTE [216, 217] rekonstruiert werden.

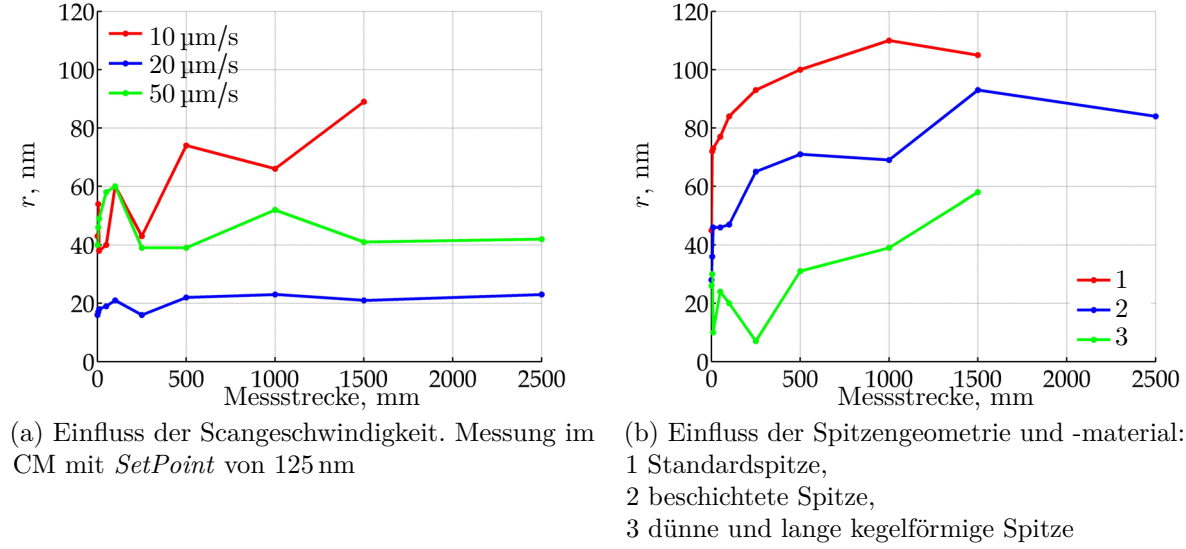


Abbildung 8.17: Verschleißverhalten der Antastspitze am Beispiel der Veränderung des Spitzenradius in x - z -Ebene

wurden stets kleinere Radii als bei Spitzen ohne Beschichtung rekonstruiert. Eine Sonde mit einer sehr dünnen und langen kegelförmigen Spitze mit $r < 5 \text{ nm}$ und $\theta < 5^\circ$ (vgl. Abbildung 4.3(b), S. 24) ermöglicht es auch trotz Verschleiß der Spitze Langstreckenmessungen mit einer hohen lateralen Auflösung durchzuführen, da der Radius trotz Abnutzung dank der besonderen Spitzenform nur langsam zunehmen kann. Die größte Radiuszunahme einer Standardspitze beläuft sich auf ca. 3 nm/mm während der ersten mm des Scanweges.

8.2.7 Kombinierte Messunsicherheit

Die Messunsicherheit kann nur einer konkreten Messung zugeordnet werden. Vor der Messunsicherheitsanalyse soll zuerst ein Modell zur Bestimmung des Messergebnisses zusammengestellt werden [81]. Das Messergebnis wird als Differenz zwischen den entsprechenden Ausgangssignalwerten des LiAFM und den z -Interferometerwerten l_z der NMM-1 gebildet. In Abhängigkeit von der Art des Antastsystems (passives oder aktives) und der Betriebsart (CM oder IM) sind das die wegproportionalen Ausgangssignalwerte p_z der Schwingungsmesskarte $S_{\text{SM-04}}$ (passives Tastsystem, Messungen im CM, vgl. Gleichung (7.10)) oder d_x (aktives Tastsystem, vgl. Gleichung (7.11)) bzw. die umgerechneten Interferometerwerte l_a (Messungen im CM, vgl. Gleichung (7.12)) oder das Amplitudensignal d_z des passiven Tastsystems (Messungen im IM, vgl. Gleichung (7.13), S. 79). Alle LiAFM-Messungen können als Differenzmessungen zwischen jeweils zwei Antastpunkten betrachtet werden. Somit kann das Messergebnis h als Differenz zwischen zwei Antastpositionen zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 angegeben werden. Z. B. gilt für das passive Tastsystem und Messungen im IM:

$$h = h(t_2) - h(t_1) = d_z(t_2) - d_z(t_1) - [l_z(t_2) - l_z(t_1)] = k_{d_z} [a_2(t_2) - a_2(t_1)] - [l_z(t_2) - l_z(t_1)], \quad (8.7)$$

das Messergebnis des aktiven Tastsystems wird folgend angegeben:

$$h = h(t2) - h(t1) = d_x(t2) - d_x(t1) - [l_z(t2) - l_z(t1)] = k_{d_{x4}} [a_1(t2) - a_1(t1)] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (8.8)$$

Berücksichtigt man die mögliche Änderungen der Umgebungsbedingungen während der interferometrischen Positionsmessung des LiAFM, kann das Messergebnis h (entsprechend Gleichung (8.5), S. 85) mit nachfolgender Gleichung (8.9) berechnet werden:

$$h = k_{d_{x4}} \left[a_1(t2) \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{norm}} n(t2)} - a_1(t1) \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{norm}} n(t1)} + \frac{2^{15}}{10k_{\text{SM-04}}} \left(l_{m,l}(t2) - l_{m,l}(t1) + l_{m,g}(t2) - l_{m,g}(t1) \right) \right] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (8.9)$$

Nach dem Einsetzen der Gleichungen (8.2) und (8.3), S. 83 in Gleichung (8.9) ergibt sich unter der Annahme $l_g = l_t$ (vgl. S. 83) folgende Gleichung:

$$h = k_{d_{x4}} \left[n_{\text{norm}} \left(\frac{a_1(t2)}{n(t2)} - \frac{a_1(t1)}{n(t1)} \right) + \frac{2^{15} l_t}{10k_{\text{SM-04}}} \left(\frac{n(0)}{n(t2)} - \frac{n(0)}{n(t1)} + \alpha_{\text{BK7}} [\vartheta(t2) - \vartheta(0)] \left(\frac{n_{\text{BK7}}(t2)}{n(t2)} - 1 \right) + \frac{n_{\text{BK7}}(t2) - n_{\text{BK7}}(0)}{n(t2)} - \alpha_{\text{BK7}} [\vartheta(t1) - \vartheta(0)] \left(\frac{n_{\text{BK7}}(t1)}{n(t1)} - 1 \right) - \frac{n_{\text{BK7}}(t1) - n_{\text{BK7}}(0)}{n(t1)} \right) \right] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (8.10)$$

Entsprechend der Modellgleichung des aktiven Tastsystems (8.10) kann man folgende Einflussgrößen bzw. Eingangsgrößen nennen [225]:

- Kalibrierkoeffizient $k_{d_{x4}}$,
- Luftbrechzahl n_{norm} bei Normalbedingungen,
- A/D-Wandlerwert a_1 zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$,
- Luftbrechzahl n bzw. Lufttemperatur ϑ , -druck p und -feuchte RH beim Nullen des Zählers des Interferometers des Sondenmesssystems sowie zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$,
- Totstrecke l_t ,
- Messbereichfaktor $k_{\text{SM-04}}$ der Schwingungsmesskarte SM-04,
- Ausdehnungskoeffizient α_{BK7} des Glases,
- Lufttemperatur ϑ beim Nullen und zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$,
- Glasbrechzahl n_{BK7} bzw. Lufttemperatur ϑ beim Nullen und zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$ sowie
- Messwert l_z der z -Achse der NMM-1 zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$.

Für die Angabe der kombinierten Messunsicherheit u_c des Messergebnisses nach GUM (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*) [166] ist die Kenntnis der Stan-

dardunsicherheiten $u(x_i)$ aller Eingangsgrößen (bzw. Einflussgrößen) x_i sowie deren Empfindlichkeitskoeffizienten c_i notwendig:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(h)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}. \quad (8.11)$$

Die Empfindlichkeitskoeffizienten c_i beschreiben die Abhängigkeit des Messergebnisses von den Eingangsgrößen x_i und werden durch die Differentialquotienten $\left|\frac{\partial h}{\partial x_i}\right|$ bestimmt (vgl. Anhang I, S. 173). Außerdem müssen auch die möglichen Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen beachtet werden [207]. Allgemein ist eine Korrelation zu erwarten, wenn die beiden Eingangsgrößen voneinander abhängig sind, oder mit einer dritten Größe zusammenhängen. Z. B. sind folgende Eingangsgrößen korreliert: Luftbrechzahl n und Lufttemperatur ϑ , Glasbrechzahl n_{BK7} und Lufttemperatur ϑ sowie Luftbrechzahl n und Glasbrechzahl n_{BK7} [225]. Mit dem Einsetzen der Gleichungen (G.1)–(G.5) (bzw. Gleichung (G.6)) für die Luftbrechzahl n und Gleichung (G.7) für die Glasbrechzahl n_{BK7} (vgl. Anhang G, S. 169) in die Modellgleichung (8.10) werden die oben genannten Einflussgrößen entkoppelt und die Korrelation aufgehoben. Weiterhin werden die Umweltparameter Lufttemperatur ϑ , -druck p und -feuchte RH beim Nullen des Zählers des Interferometers des Sondenmesssystems sowie zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$ mit denselben Sensoren erfasst. Somit besteht eine Korrelation zwischen den zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Umweltparametern. Die Umweltdaten zu den Zeitpunkten (Messpunkten) $t1$ und $t2$ werden entsprechend des Berechnungsansatzes nach [81, 189] durch jeweils zwei Differenzwerte ersetzt, um eine Entkopplung der Einflussgrößen für die Unsicherheitsberechnung zu erreichen:

$$\begin{aligned} \vartheta(t1) &= \vartheta(0) + \Delta\vartheta_1, & \vartheta(t2) &= \vartheta(t1) + \Delta\vartheta_2 = \vartheta(0) + \Delta\vartheta_1 + \Delta\vartheta_2, \\ p(t1) &= p(0) + \Delta p_1, & p(t2) &= p(t1) + \Delta p_2 = p(0) + \Delta p_1 + \Delta p_2, \\ \text{RH}(t1) &= \text{RH}(0) + \Delta \text{RH}_1, & \text{RH}(t2) &= \text{RH}(t1) + \Delta \text{RH}_2 = \text{RH}(0) + \Delta \text{RH}_1 + \Delta \text{RH}_2. \end{aligned} \quad (8.12)$$

Die einzelnen A/D-Wandlerwerte $a_1(t1)$ und $a_1(t2)$ werden nachfolgend durch einen Differenzwert Δa_1 ersetzt:

$$\Delta a_1 = a_1(t2) - a_1(t1). \quad (8.13)$$

So wird anstatt der Wegdifferenz Δl_z die Differenz der Messwerte der z -Achse $l_z(t1)$ und $l_z(t2)$ in Gleichung (8.10) eingesetzt:

$$\Delta l_z = l_z(t2) - l_z(t1). \quad (8.14)$$

Aufgrund der sehr komplexen Abhängigkeiten des Messergebnisses h von Umweltparametern (vgl. Anhang I) empfiehlt sich die numerische Berechnung der partiellen Ableitungen bzw. Sensitivitätskoeffizienten.

Die kombinierte Messunsicherheit des Messergebnisses wurde anhand der aufgenommenen Daten während einer Oberflächenmessung mit (a) und ohne (b) Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur für vier unterschiedlichen Messbedingungen (I–IV) berechnet:

- (I) Kurzzeitmessung (bis 0,5 Stunden) mit angeschalteter Temperierung (Temperaturstabilität: ± 5 mK, Druck-: ± 10 Pa und Feuchteschwankungen: $\pm 0,1$ %),
- (II) Kurzzeitmessung (bis 0,5 Stunden) ohne Temperierung (Temperaturstabilität: ± 100 mK, Druck-: ± 10 Pa und Feuchteschwankungen: $\pm 0,5$ %),
- (III) Langzeitmessung (ca. 24 Stunden und mehr) mit angeschalteter Temperierung (Temperaturstabilität: ± 10 mK, Druck-: ± 1000 Pa und Feuchteschwankungen: ± 5 %),
- (IV) Langzeitmessung (ca. 24 Stunden und mehr) ohne Temperierung (Temperaturstabilität: ± 1 K, Druck-: ± 1000 Pa und Feuchteschwankungen: ± 5 %).

Die Einflussgrößen, deren Schätzwerte x_i , Standardunsicherheiten $u(x_i)$, Sensitivitätskoeffiziente c_i und wesentliche Unsicherheitsbeiträge $u_i(h)$ sind in der Tabellen 8.6 zusammengefasst. Zusätzlich wurden die Unsicherheitswerte u_r (vgl. Gleichung (7.9)) der Residuen r (vgl. Gleichung (7.8)) der Kalibrierkennlinien und deren -koeffizienten zur Abschätzung der Driften und des Kriechens der Signale des LiAFM nach [81] einbezogen.

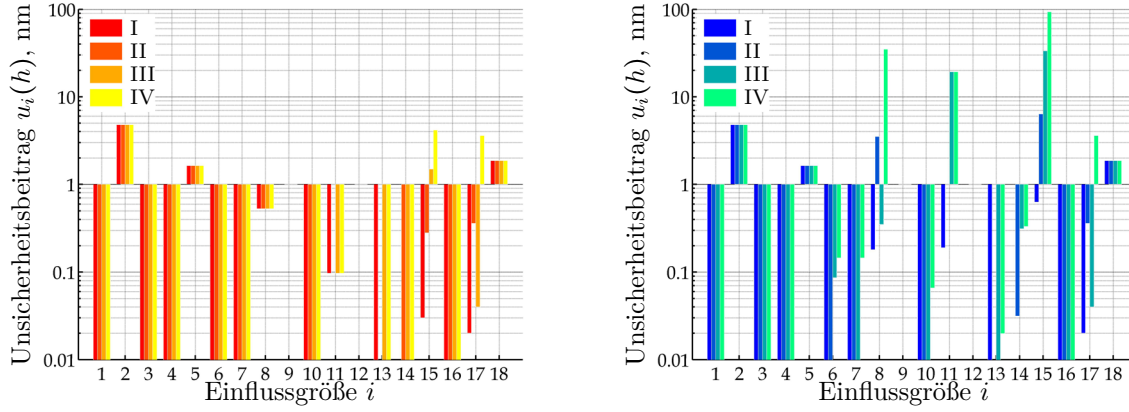
Die Schätzwerte der Umweltdaten $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$, Δp_1 , Δp_2 , ΔRH_1 und ΔRH_2 basieren auf zahlreichen, über mehrere Monate mittels des Umweltdatenerfassungssystems der NMM-1 aufgenommenen, Daten (vgl. Abschnitt 8.2.5, S. 95). Die Standardunsicherheiten der Umweltdaten werden im Falle (a) aus [81] S. 158–159 entnommen. Im anderen Fall (b) werden die Standardunsicherheiten nach der Ermittlungsmethode Typ-B nach GUM [166] eingesetzt. Die Totstrecke l_t ist bis auf ± 1 mm bekannt (vgl. Abschnitt 8.1). Allerdings wird im Falle der Nichtberücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur die Standardunsicherheit der Totstrecke gleich der Totstrecke selbst angenommen: $u(l_t) = l_t = 13$ mm. Die Standardunsicherheit der Wegdifferenz $u(\Delta l_z)$ kann aus [189], S. 75 entnommen werden. Die kombinierte Positionierungsunsicherheit $u(l_z)$ für die z -Messachse der NMM-1 beläuft sich auf 6,81 nm. Dabei resultiert der größte Beitrag von 6,55 nm zur Positionierungsunsicherheit $u(l_z)$ aus der Messung und Darstellung der Oberflächenabweichungen der Spiegelecke [189]. Bei AFM-Messungen innerhalb des Messbereiches von wenigen mm kann dieser Unsicherheitsbeitrag vernachlässigt werden. Somit verringert sich die Positionierungsunsicherheit $u(l_z)$ auf 1,86 nm (vgl. Tabelle 8.6).

Die berechnete kombinierte Standardunsicherheit u_c des Messergebnisses während der Kurzzeitmessungen (I–II) beläuft sich auf 6 nm [225]. Während der Langzeitmessungen (III–IV) steigt dieser Wert von 8 nm im Falle (a), auf 20 nm mit angeschalteter Temperierung (III) und auf 40 nm ohne Temperierung (IV) im Falle (b) (vgl. Tabelle 8.6). Aus der Tabelle 8.6 und Abbildung 8.18 wird ersichtlich, dass die Unsicherheitsbeiträge der Residuen r ($u_2(h)$), Differenzwerten Δa_1 ($u_5(h)$), $\Delta\vartheta_2$ ($u_8(h)$), Δp_2 ($u_{11}(h)$), Totstrecke l_t ($u_{15}(h)$), Ausdehnungskoeffizienten des Glases α_{BK7} ($u_{17}(h)$) und Wegdifferenz Δl_z ($u_{18}(h)$) gegenüber den restlichen Unsicherheitsbeiträgen dominant sind.

Einfluss- größe i	Bezeichnung	Schätz- wert x_i	Einheit	Standardmess- unsicherheit $u(x_i)$		Sensitivitäts- koeffizient $ c_i = \left \frac{\partial h}{\partial x_i} \right $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(h) = c_i u(x_i)$, m		Anmerkung
				a	b		a	b	
$k_{d_{x4}}$	I Polynom- koeffizient,	$0,29 \cdot 10^{-9}$	m/Digit	$20,8 \cdot 10^{-15}$		121,03	$2,52 \cdot 10^{-12}$		$k_{d_{x4}}$ und $u(k_{d_{x4}})$ aus Regression über die Kennlinie (Tabelle 7.3, S. 78)
	II					101,25	$2,11 \cdot 10^{-12}$		
	III Kalibrier- koeffizient					7,54	$0,16 \cdot 10^{-12}$		
	IV					199,58	$4,16 \cdot 10^{-12}$		
r	Residuen		m				$4,8 \cdot 10^{-9}$		Unsicherheitswert u_r der Residuen r der Kalibrierung (Gleichung (7.9))
Δa_1	Differenz- wert	123	Digit	5,63		$290,01 \cdot 10^{-12}$	$1,63 \cdot 10^{-9}$		Unsicherheitsbeitrag $u(\Delta a_1) = u_{\text{ADC}}$ nach [81], S. 175
$\Delta \vartheta_2$	Temperatur- differenz	0,005	K	0,0087	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$	$60,8 \cdot 10^{-9}$	$0,53 \cdot 10^{-9}$	$0,18 \cdot 10^{-9}$	$u(\Delta \vartheta_2)$: a nach [81], S. 159, b $\Delta \vartheta_2$ wird abgeschätzt
		0,1			$\frac{0,1}{\sqrt{3}}$			$3,51 \cdot 10^{-9}$	
		0,01			$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$			$0,35 \cdot 10^{-9}$	
		1			$\frac{1}{\sqrt{3}}$			$35,00 \cdot 10^{-9}$	
Δp_2	Druck- differenz	10	Pa	2,9	$\frac{10}{\sqrt{3}}$	$33,47 \cdot 10^{-12}$	$97,07 \cdot 10^{-12}$	$0,19 \cdot 10^{-9}$	$u(\Delta p_2)$: a nach [81], S. 159, b Δp_2 wird abgeschätzt
		10				$33,47 \cdot 10^{-12}$	$97,07 \cdot 10^{-12}$	$0,19 \cdot 10^{-9}$	
		1000			$\frac{1000}{\sqrt{3}}$	$33,47 \cdot 10^{-12}$	$97,07 \cdot 10^{-12}$	$19,33 \cdot 10^{-9}$	
		1000				$33,36 \cdot 10^{-12}$	$96,74 \cdot 10^{-12}$	$19,26 \cdot 10^{-9}$	

l_t	I	Totstrecke	$13 \cdot 10^{-3}$	m	$\frac{1 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}}$	$13 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-6}$	$0,03 \cdot 10^{-9}$	$0,63 \cdot 10^{-9}$	$u(l_t)$: a l_t ist bis auf ± 1 mm bekannt (vgl. S. 84), b komplette Totstrecke
	II						$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-9}$	$6,37 \cdot 10^{-9}$	
	III						$2,58 \cdot 10^{-6}$	$1,49 \cdot 10^{-9}$	$33,54 \cdot 10^{-9}$	
	IV						$7,20 \cdot 10^{-6}$	$4,16 \cdot 10^{-9}$	$93,60 \cdot 10^{-9}$	
α_{BK7}	I	Ausdehnungskoeffizient des Glases	$7,1 \cdot 10^{-6}$	1/K	$\frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}}$		$0,06 \cdot 10^{-3}$	$0,02 \cdot 10^{-9}$	l_t $u(\alpha_{BK7})$: α_{BK7} wird mit $\pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ abgeschätzt	
	II						$1,25 \cdot 10^{-3}$	$0,36 \cdot 10^{-9}$		
	III						$0,13 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-9}$		
	IV						$12,48 \cdot 10^{-3}$	$3,60 \cdot 10^{-9}$		
Δl_z	Wegdifferenz		$21,61 \cdot 10^{-9}$	m	$6,81 \cdot 10^{-9}$		1	$6,81 \cdot 10^{-9}$	Unsicherheitsbeitrag $u(\Delta l_z)$ nach [189], S. 75	
					$1,86 \cdot 10^{-9}$		$1,86 \cdot 10^{-9}$			
Kombinierte										
Schätzwert										
Standardunsicherheit u_c										
h	I	Messergebnis		m	$14,12 \cdot 10^{-9}$			$5,39 \cdot 10^{-9}$	$5,37 \cdot 10^{-9}$	$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{18} u_i^2(h)}$
	II							$5,41 \cdot 10^{-9}$	$6,43 \cdot 10^{-9}$	
	III							$5,59 \cdot 10^{-9}$	$20,12 \cdot 10^{-9}$	
	IV							$7,70 \cdot 10^{-9}$	$40,68 \cdot 10^{-9}$	

Tabelle 8.6: Wesentliche Unsicherheitsbeiträge zur kombinierten Messunsicherheit nach Modellgleichung (8.10)



(a) Brechzahländerungen und Totstreckenkorrektur wurden berücksichtigt

(b) Brechzahländerungen und Totstreckenkorrektur wurden nicht berücksichtigt

Abbildung 8.18: Vergleich der Unsicherheitsbeiträge $u_i(h)$ (1 k_{d_x4} , 2 r , 3 n_{norm} , 4 $a_1(t1)$, 5 Δa_1 , 6 $\vartheta(0)$, 7 $\Delta\vartheta_1$, 8 $\Delta\vartheta_2$, 9 $p(0)$, 10 Δp_1 , 11 Δp_2 , 12 $\text{RH}(0)$, 13 ΔRH_1 , 14 ΔRH_2 , 15 l_t , 16 $k_{\text{SM-04}}$, 17 α_{BK7} , 18 Δl_z)

Vergleicht man die Unsicherheitsbeiträge der Umweltparameter $\Delta\vartheta_2$ ($u_8(h)$) und Δp_2 ($u_{11}(h)$) sowie der Totstrecke l_t ($u_{16}(h)$) wird deutlich, dass während der Kurzzeitmessungen (I–II) weder die Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur noch das Anschalten der Temperierung notwendig sind. Während Langzeitmessungen sind große Luftdruckschwankungen besonders kritisch. Die Druckschwankungen können, im Unterschied zu Temperatur und Luftfeuchte, nicht beeinflusst werden. Somit ist es empfehlenswert, den Luftdruck sowie weitere Umweltparameter aufzuzeichnen um gegebenenfalls die Brechzahländerungen und deren Einfluss auf die Totstrecke nachträglich zu korrigieren. Weiterhin sollte man während der Planung einer Messung die Reduzierung der Messzeit durch Erhöhung der Scangeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 9.5) [221, 224] und Anwendung intelligenter Messstrategien (vgl. Abschnitt 9.3 und Kapitel 10) [220, 223] in Betracht ziehen.

Mit einer umfangreichen Konstruktionsänderung des Sondenmesssystems können optische Wege im Mess- und Referenzarm des Interferometers angeglichen werden. Eine der Maßnahmen wäre die Integration eines Glaskörpers der Länge l_g mit gleichen mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften wie neutraler Strahlteiler (NT) und die Fokussierlinse im Referenzarm des Interferometers (vgl. Abbildung 8.1, S. 83). Modellgleichung (8.10) wäre dann folgend:

$$h = k_{d_x4} n_{\text{norm}} \left[\frac{a_1(t2)}{n(t2)} - \frac{a_1(t1)}{n(t1)} \right] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (8.15)$$

Im nächsten Kapitel 9 werden unterschiedliche repräsentative Messungen vorgestellt und diskutiert.

9 Applikationsmessungen

Das laserinterferometrische Rasterkraftmikroskop (LiAFM) wird für unterschiedliche Messaufgaben eingesetzt. Neben den für die dimensionelle Metrologie sehr wichtigen Stufenhöhen- (vgl. Abschnitt 9.1) und Gitterabstandsmessungen (vgl. Abschnitt 9.2) werden nachfolgend Messungen an Kugeloberflächen (vgl. Abschnitt 9.4) sowie Langstrecken- (vgl. Abschnitt 9.3) und Hochgeschwindigkeitsmessungen (vgl. Abschnitt 9.5) vorgestellt. Die Stufenhöhen- und Gitternormale dienen zur vertikalen und lateralen Kalibrierung und Prüfung von konventionellen kommerziellen Rastersondenmikroskopen [180].

9.1 Stufenhöhennormale

Die verwendeten Stufenhöhennormale wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen der PTB und dem Institut für Mikroelektronik Stuttgart entwickelt und hergestellt. Der baugleiche Satz von Normalen wurde im Rahmen des Ringvergleichs “Nano2 – Step Height Standards” [116] mittels Interferenzmikroskopen, Interferometern, Rasterkraftmikroskopen und Profilometern gemessen.

Ein Stufenhöhennormal weist eine stufenförmige Schicht aus Si-Oxid in Form unterbrochener Linien auf (vgl. Abbildung 9.1). Die Stufenbreite der linken Linie beträgt ca. 100 μm , die der Rechten 30 μm . Die Oberfläche des Normals ist zusätzlich verchromt, um optische Antastung zu ermöglichen.

Die Kalibrierung der Normalen erfolgte bei der PTB mit dem AFM Veritekt B [75]. In Abbildung 9.1 ist der Kalibrierbereich R1 der 30 μm breiten Linie dargestellt. Die Stufenhöhe bzw. die Dicke der Oxidschicht ist als mittlerer senkrechter Abstand zwischen den Oberflächen der Oxidschicht und des Grundwerkstoffes angegeben. Die Länge der Scanlinien (vgl. Abbildung 9.2) sowie deren Mindestanzahl sind in der Norm DIN EN ISO 5436-1 [165] definiert. Für die Berechnung der Stufenhöhe H kann die in [165] vorgeschlagene Methode angesetzt werden. Die Gleichung

$$h = \alpha x + \beta + \delta H/2 \quad (9.1)$$

mit den Längenwerten x , Höhenwerten h (z. B. die Differenz zwischen wegproportionalen Ausgangssignalwerten der Schwingungsmesskarte SM-04 und z -Interferometerwerten der NMM-1), Unbekannten α , β und H ist nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate an ein gemessenes Profil anzupassen. Die Variable δ hat den Wert +1 im Bereich C und -1 in den Bereichen A und B (vgl. Abbildung 9.2). Weitere Bereiche, insbesondere Kanten, werden nicht berücksichtigt.

Ein Satz von kalibrierten Stufenhöhennormalen C26R18 [149] wurde mit dem LiAFM in den beiden Betriebsarten *Contact*-Modus (CM) und *Intermittent*-Modus (IM) sowie in den Scanrichtungen vorwärts (FWD) und rückwärts (BWD), bzw. während der Bewegung der Spiegelecke in positive und negative y -Richtung, vermessen [50, 224]. Die Messungen

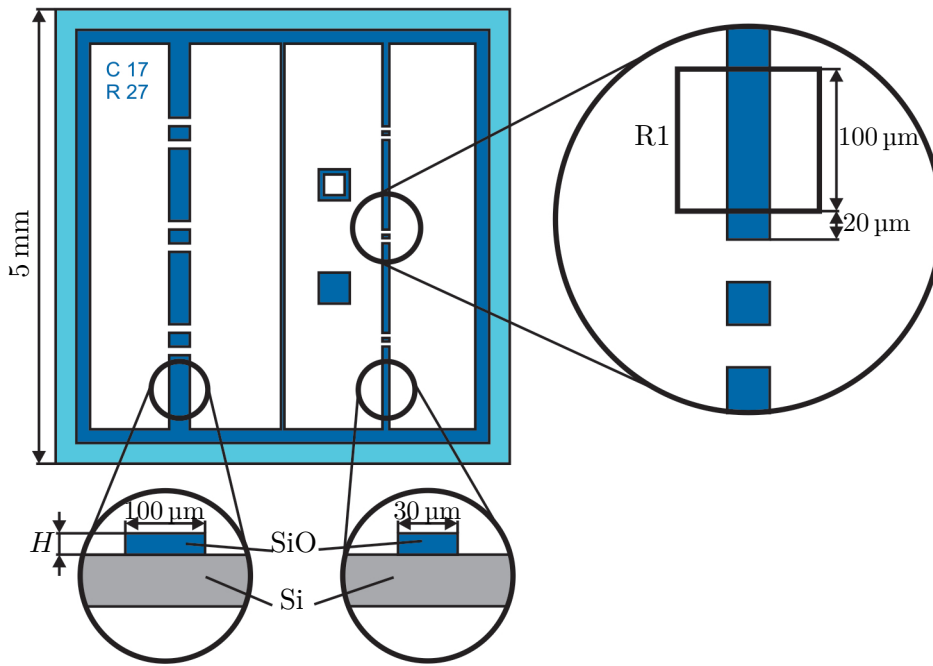


Abbildung 9.1:
Stufenhöhennormal [116]

wurden an den 7 nm (C26R18), 20 nm (C18R18) und 70 nm (C17R27) Normalen durchgeführt. Jedes mal wurde das Normal auf der Spiegelecke der NMM-1 so ausgerichtet, dass die Struktur möglichst orthogonal zur Scanrichtung verläuft. Der Messpunkt Abstand in Scanrichtung betrug 10^{25} , 50^{26} bzw. 100^{27} nm. Insgesamt wurden 42 $100\text{ }\mu\text{m}$ lange Linien (vorwärts (FWD) und BWD), gleichmäßig verteilt über den Bereich R1, gemessen. Eine der gemessenen Linien sowie der gescannte Bereich R1 der Normal C17R27 sind in Abbildung 9.3 zu sehen. Die gesamte Messung wurde 30^{28} bzw. 21^{29} mal wiederholt. Die Höhe der Stufe wurde für jede gemessene Linie nach Gleichung 9.1 mittels kommerzieller Software MATLAB[®] berechnet. Schließlich wurde die Stufenhöhe des Bereiches R1 als Mittelwert der Stufenhöhen der einzelnen Linien (FWD und BWD) bestimmt. Zuletzt wurden alle Scans (FWD und BWD) verarbeitet. Die resultierenden mittleren Stufenhöhen H über alle Messungen sind in Tabelle 9.1 angegeben. Die dazugehörigen erweiterten Mess-

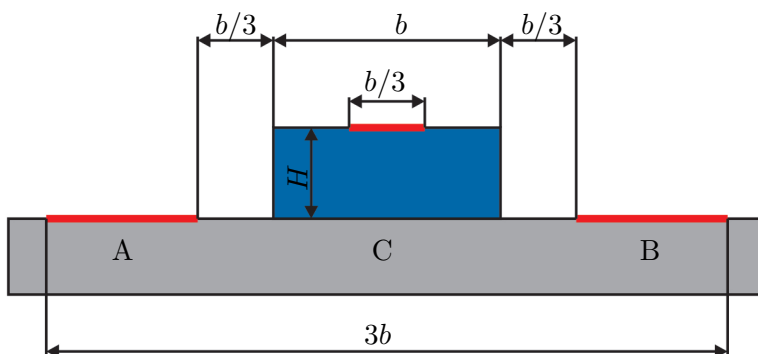


Abbildung 9.2: Messbereiche für die Berechnung der Stufenhöhe [165]

²⁵IM Messungen.

²⁶CM Messungen am C17R27 Normal.

²⁷CM Messungen an den C26R18 und C18R18 Normalen.

²⁸CM Messungen.

²⁹IM Messungen.

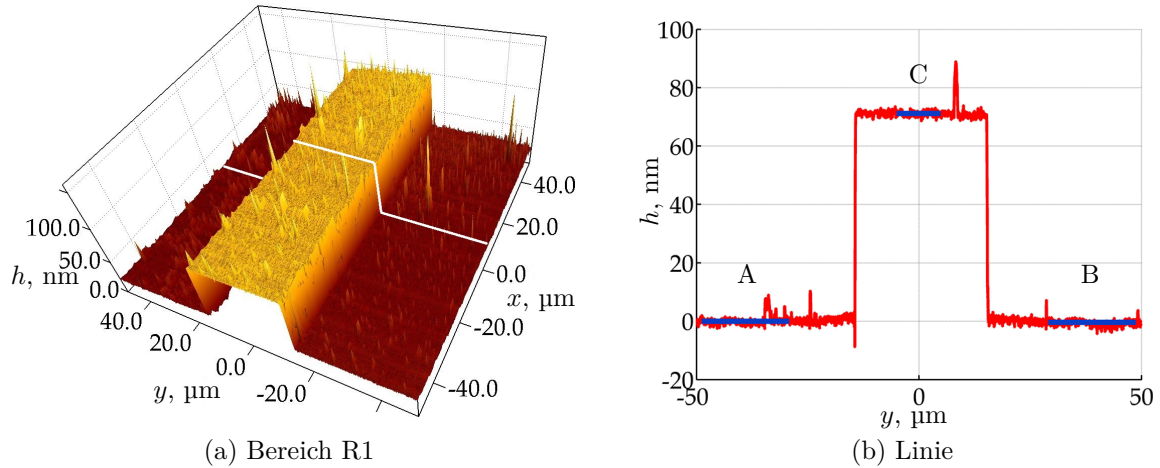


Abbildung 9.3: Im IM rückwärts (BWD) gemessenes Stufenhöhennormal C17R27

Normal	PTB		LiAFM							
			CM				IM			
			FWD		BWD		FWD		BWD	
	H , nm	U , nm	H , nm	U , nm	H , nm	U , nm	H , nm	U , nm	H , nm	U , nm
C26R18	7,4	1,0	7,6	0,15	7,6	0,11	7,15	0,03	7,21	0,04
C18R18	21,2	1,1	21,9	0,11	21,9	0,07	20,16	0,04	20,17	0,04
C17R27	69,1	1,2	70,06	0,05	70,12	0,07	69,88	0,05	69,92	0,07

Tabelle 9.1: Ergebnisse den Stufenhöhenmessungen ($k = 2$)

unsicherheiten U wurden aus den Standardabweichungen des jeweiligen Mittelwerts [166] und dem Erweiterungsfaktor k berechnet. Die Gesamtmesszeit für ein Normal betrug einige Stunden. Bei einer Temperierung der Akustikhaube der NMM-1 von ± 10 mK kommt es zu keinem bemerkenswerten Umwelteinfluss auf das Messergebnis (vgl. Abschnitt 8.2.7). Der größte Einfluss stammt von der Gleichmäßigkeit, Rauheit und Sauberkeit der Normalen. Die Differenzen zwischen den PTB-Werten (Kalibrierwerten) und den Ergebnissen der Auswertung blieben innerhalb der erweiterten Messunsicherheiten der Kalibrierwerte. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse der Stufenhöhenmessungen ist dabei deutlich kleiner als 0,5 nm.

9.2 Gitterstrukturen

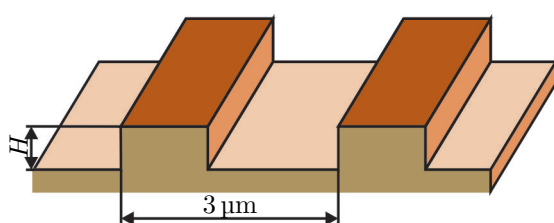
Eine weitere spezielle Anwendung des LiAFM ist die Pitchmessung. Als Pitch wird ein Abstand gleichartiger äquidistanter Strukturen, z. B. eines Gitters, oder dessen Periodenlänge bezeichnet [180]. Eindimensionale Gitter können als laterale Normale für die x - y -Kalibrierung, Bestimmung von Nichtlinearitäten des Piezoscanners eines AFM sowie zur Identifizierung von Bildverzerrungen bei Mikroskopen verwendet werden.

Im Folgenden wird gezeigt, dass das LiAFM in Kombination mit der NMM-1 für hochpräzise Bestimmung von Gitterabständen geeignet ist und neben der optischen Diffraktometrie für die Kalibrierung von Normalen angewendet werden kann.

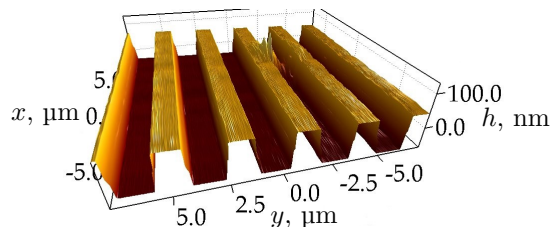
Es wurden Messungen an drei unterschiedlichen Typen von 1D-Gitterstrukturen durchgeführt: 3 μm TGZ³⁰-Gitter (vgl. Abbildung 9.4) mit unterschiedlichen Strukturhöhen der Firma NT-MDT Co. [168], Glasmaßstab mit 8 μm Pitch sowie eine spezielle Teststruktur mit 45 nm Strukturperiode.

Die Struktur der TGZ-Gitter besteht aus Si-Oxid. Die schematische Skizze des TGZ-Gitters ist in Abbildung 9.4(a) gezeigt. Die Messungen wurden jeweils an den TGZ1 und TGZ2 Normalen mit den Strukturperioden von $3 \pm 0,05 \mu\text{m}$ und -höhen von $18,5 \pm 1 \text{ nm}$ und $108,5 \pm 2 \text{ nm}$ durchgeführt [50]. Für die Bestimmung von Strukturperioden ist die Ausrichtung der Gitterstrukturen besonders wichtig, weil der Pitch als senkrechter Abstand zu den Gitterlinien angegeben wird. Da die exakte Ausrichtung der Gitterstrukturen zu den Achsen der NMM-1 nur bedingt möglich ist, muss diese ermittelt werden. Eine Bestimmungsmethode basiert auf den Linienscans in unterschiedlichen definierten Richtungen (vgl. Abbildung 9.5(a)). Die Ausrichtung (Winkellage) des Normalen kann mit zwei solchen Suchlinien ermittelt werden. Eine weitere Methode beruht auf lateralversetzten (bzw. parallelverschobene) Linienscans. Die Ausrichtung des Normalen kann aus den Kantenpositionen einer Gitterlinie bestimmt werden (vgl. Abbildung 9.5(b)). Danach ist es möglich während der Messung die Scanrichtung an die Ausrichtung des Normalen anzupassen. Alternativ kann nach einem Scan entlang einer der Achsen der NMM-1 die ermittelte Strukturbreite korrigiert werden.

Die Messungen wurden in den beiden Betriebsarten CM und IM sowie in beide Scanrichtungen (FWD und BWD) durchgeführt [50, 79]. Das gescannte Bild der TGZ2 Normal ist in Abbildung 9.4(b) dargestellt. Um gute statistische Ergebnisse zu erzielen wurden sehr lange Scanlinien $>500 \mu\text{m}$ mehrfach wiederholt. Im CM wurden 600 μm langen Linien mit einem Messpunktabstand von 25 nm jeweils 50 Mal gescannt. Im IM wurden die Messungen mit dem Messpunktabstand von 50 nm jeweils 21 Mal wiederholt, wobei die Scanlänge 1 mm betrug. Das gescannte Profil TGZ2, sowie dessen Vergrößerung, sind in Abbildung 9.6 dargestellt. Die Verarbeitung der Messdaten und Auswertung des mittleren



(a) Skizze des TGZ-Gitters [50]



(b) Übersichtsmessung im CM BWD des TGZ2-Gitters

Abbildung 9.4: 1D-Gitterstruktur

³⁰Strukturbezeichnung.

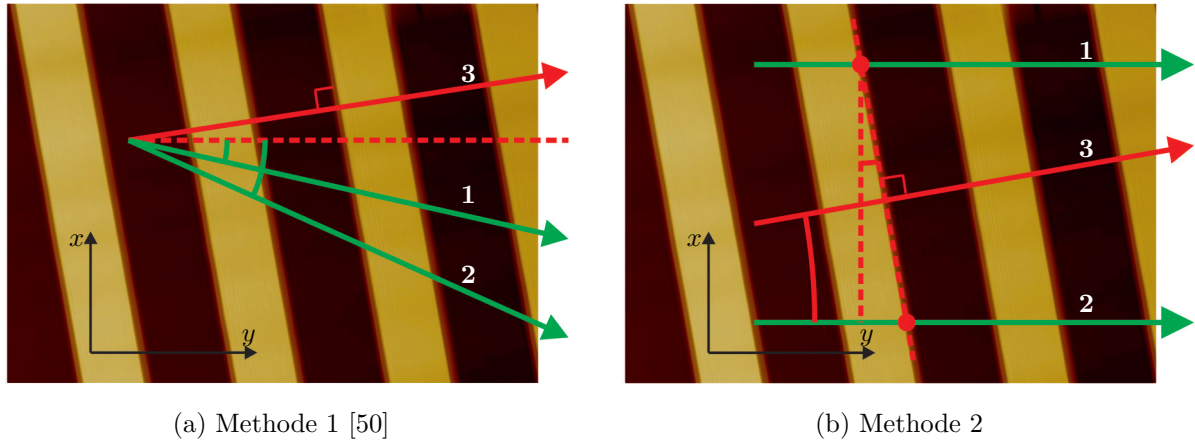


Abbildung 9.5: Bestimmung der Scanrichtung für Gitterscan (1 Suchlinie 1, 2 Suchlinie 2, 3 Scanrichtung)

Pitch kann, nach einem Abzug von langwelligen Profilabweichungen bzw. der mittleren Linie des Profilfilters, nach der Schwerpunkt bzw. *centre of gravity* (COG) oder Fourier-Transformation (FT) Methode [41] erfolgen.

Die Gitterperioden wurden nach der Fourier-Transformation (FT) Methode berechnet. Dabei wurden die gescannten Profile als eine Überlagerung von Sinusfunktionen betrachtet. Die FT wandelt die aus unterschiedlichen Wellenlängen überlagerten Profile in die Wellenlängenspektren um. Die Spektren haben sehr deutliche Spitzen (*Peaks*), welche den mittleren Strukturperioden entsprechen (vgl. Abbildung 9.7(a)). Allerdings ist die Auflösung der diskreten (schnellen) FT durch den Messpunktstand sowie durch die geringe Anzahl von Messpunkten begrenzt. Somit wurden die resultierenden Strukturperioden iterativ mittels kontinuierlichen FT der Profildaten, ausgehend von mit schnellen FT berechneten Perioden, bestimmt [41]. Diese FT Methode zeichnet sich durch Unempfindlichkeit gegen Rauschen und punktuellen Störungen aus [180].

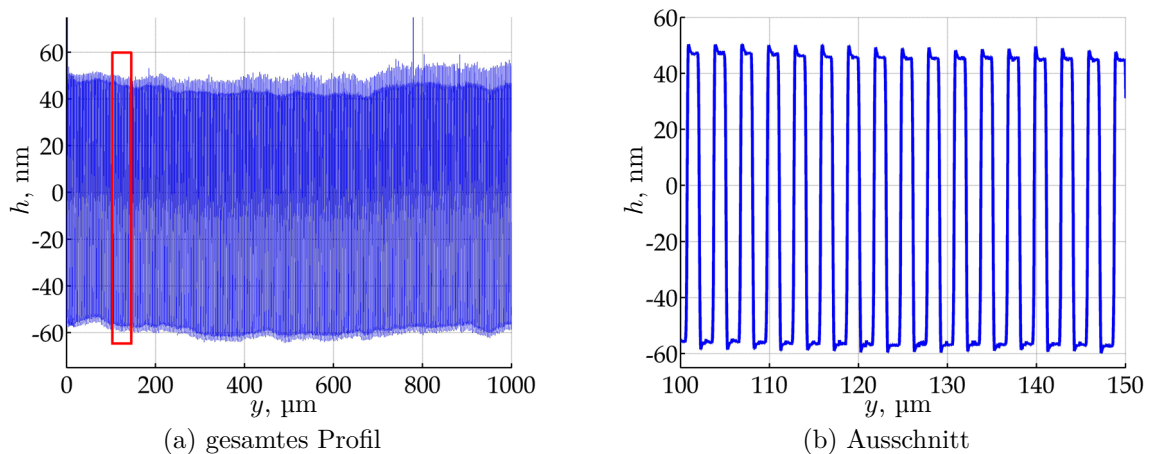


Abbildung 9.6: Im IM FWD gemessenes Profil des TGZ2-Gitters

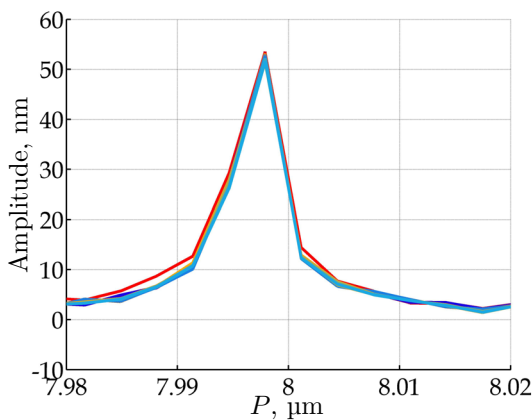
Normal	CM				IM			
	FWD		BWD		FWD		BWD	
	P , nm	U , nm	P , nm	U , nm	P , nm	U , nm	P , nm	U , nm
TGZ1	3000,23	0,03	3000,19	0,03	3000,001	0,005	2999,988	0,004
TGZ2	3000,002	0,006	3000,045	0,005	3000,010	0,019	3000,049	0,018

Tabelle 9.2: Ergebnisse der TGZ Gittermessungen³¹ ($k = 2$)

Die berechneten mittleren Strukturperioden P sowie die dazugehörigen erweiterten Messunsicherheiten U sind in Tabelle 9.2 zusammengefasst.

Folgende Messaufgabe demonstriert die Anwendung des LiAFM für die Langstreckmessungen. Um die mittlere Gitterperiode eines Glasmaßstabes zu bestimmen, wurden drei 20 mm lange Linienscans (im IM mit 20 nm Messpunktabstand) jeweils um 1 mm versetzt an unterschiedlichen Stellen des Messobjektes durchgeführt [218]. Die Messung wurde 10 Mal wiederholt. Für jeden Linienscan wurde mittels schneller FT das Wellenlängenspektrum berechnet (vgl. Abbildung 9.7(a)). In Abbildung 9.7(a) ist deutlich zu erkennen, dass die Auflösung der schnellen FT begrenzt ist. Für die präzise Bestimmung des mittleren Gitterabstandes wird die oben beschriebene iterative Methode verwendet. Für jede Linienposition wurden die mittlere Pitchgröße und die erweiterte Messunsicherheit (aus 10 Wiederholungen) berechnet (vgl. Abbildung 9.7(b)). Die resultierende Gitterperiode über alle gemessene Profile beträgt 8000,055 nm ($U = 0,013$ nm, $k = 2$).

Anschließend wurden Messungen an einer speziellen Teststruktur mit einer nominellen Gitterperiode von 45 nm durchgeführt [225]. Für die Bestimmung der Gitterperioden wurde ein $0,3 \mu\text{m} \times 1,2 \mu\text{m}$ großes Messfeld (vgl. Abbildung 9.8(a)) mit einem Messpunktabstand von 1 nm sowie einem Abstand von 4 nm zwischen den Linien ausgewählt. Die Messungen wurden mit einem speziellen SS-ISC *Cantilever* der Firma Team Nanotec GmbH [211] mit einer besonders “scharfen” Spitze ($r < 5$ nm, vgl. Abbildung 4.3(b), S. 24) durchgeführt. Für



(a) berechnete Spektren mittels schnellen FT

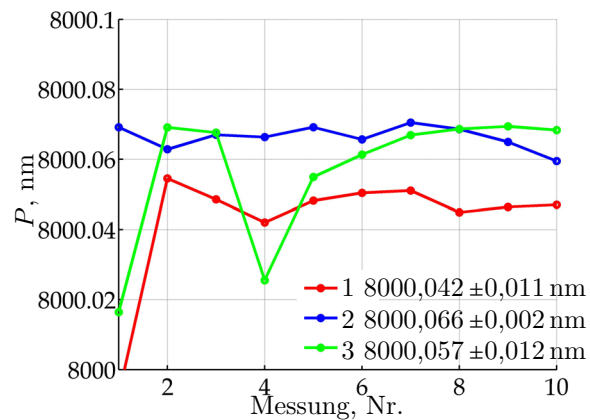
(b) Messergebnisse ($k = 2$)

Abbildung 9.7: Ergebnissen der Glasmaßstabmessungen

³¹Die TGZ-Gitterstrukturen waren nicht kalibriert.

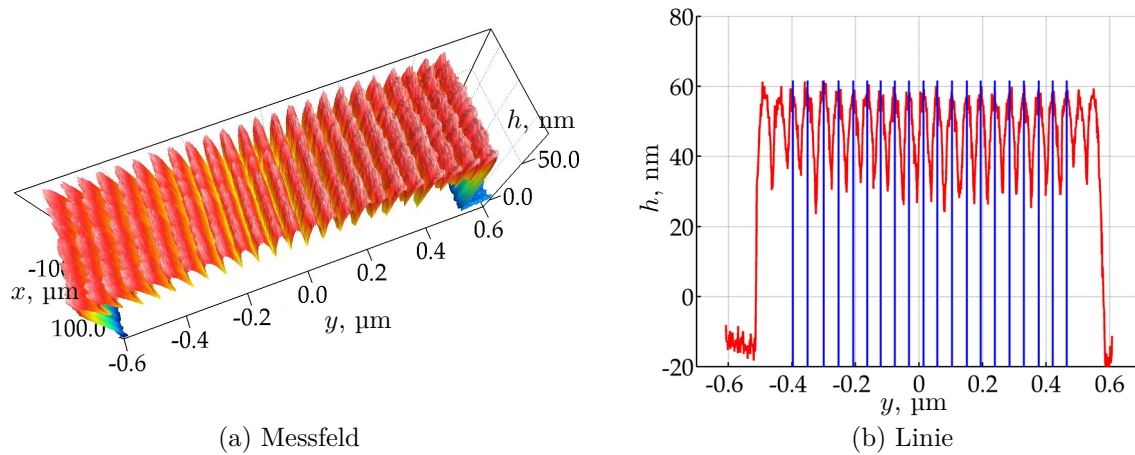


Abbildung 9.8: Im IM FWD gemessene Teststruktur

jedes gemessenes Profil (vgl. Abbildung 9.8) wurde die Strukturperiode mittels FT und Schwerpunkt bzw. *centre of gravity* (COG) Methoden ermittelt. Die mittlere Periode über das ganze Messfeld (alle 76 gemessene Profile) beträgt 44,964 nm ($U = 0,014$ nm, $k = 2$).

Die COG Methode ermöglicht die Abstände zwischen einzelnen Strukturen zu bestimmen 9.8(b) sowie lokale Strukturfehler zu detektieren. Diese Methode ist empfindlich gegen Rauschen, Fremdpartikel, Rauheit und Welligkeit des Messobjektes. Die COG Methode wird detailliert im nachfolgenden Abschnitt 9.3 beschrieben.

9.3 Langstreckenmessungen

Die Einsatzvielfältigkeit des LiAFM für Langstreckenmessungen kann durch eine ganze Reihe von Beispielen demonstriert werden. Eines ist die Glasmaßstabmessung, die bereits im vorherigen Abschnitt 9.2 vorgestellt wurde. Ein anderes Anwendungsbeispiel zeigt die Profilmessung eines LWL wie in Abbildung 9.9 dargestellt [218]. Hier handelt sich um die Bestimmung der nanoskaligen Oberflächenrauheit mantelloser Silikonfaser [130]. Zur normgerechten Messung der Oberflächenrauheit wird gewöhnlich ein Tastschnittgerät bzw. *Profilometer* eingesetzt. Dessen Messprinzip ähnelt dem des AFM. Allerdings ist der Radius der Tastnadel (*Stylus*) viel größer als bei AFM-*Cantilevern* und beträgt 2...5 µm. Auch ist die für die Messung notwendige Antastkraft viel höher als beim AFM. Die Tastspitze wirkt wie ein Tiefpassfilter (vgl. Abbildung 8.14, S. 97), wodurch die Oberflächen mit Nanostrukturen nicht vollständig erfasst werden können. Dank dem viel kleineren Spitzenradius erlaubt das AFM eine bessere laterale Auflösung der Nanostrukturen [71] und ermöglicht eine zerstörungsfreie Untersuchung von empfindlichen Oberflächen. Die erforderlichen Messstrecken für die Bestimmung von Rauheitswerten sind in der Norm für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit DIN EN ISO 4288 [164] vordefiniert. Die notwendige Messstrecke von mindestens 0,4 mm ist zu lang für kommerzielle AFM. Diese Strecke kann aber problemlos mit Hilfe der NMM-1 gescannt werden.

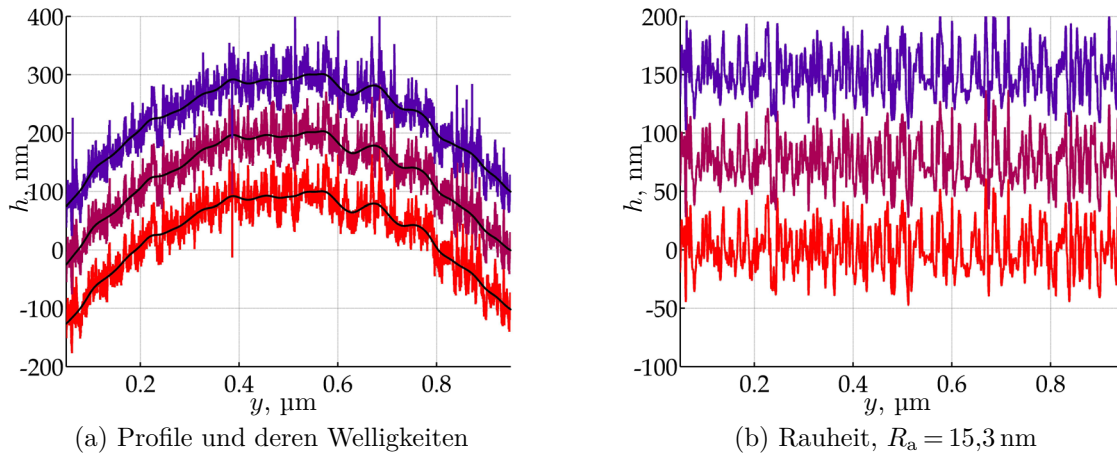


Abbildung 9.9: Gemessene Profile einer mantellosen Silikonfaser

Um die Oberflächenbeschaffenheit einer mantellosen Silikonfaser zu untersuchen, wurden mehrere 1 mm lange Profillinien in der dynamischen Betriebsart IM gemessen [218]. Der Messpunktastand betrug dabei 2 nm. Die gemessenen Gesamtprofile wurden mittels eines Gauß-Filters nach DIN EN ISO 11562 [162] zuerst bei kurzer (*short*) Wellenlänge $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$ und dann bei der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,08 \text{ mm}$ (*cut-off*), entsprechend der DIN EN ISO 3274 [163] gefiltert. Die Rauheitsparameter wurden aus den gefilterten Profilen (Rauheitsprofilen) berechnet. Für die ausgewählten Filterparameter betragen der arithmetische Mittenrauwert $R_a = 15,3 \text{ nm}$ und der quadratische Mittenrauwert $R_q = 18,9 \text{ nm}$ [218]. In Abbildung 9.9(b) sind exemplarisch drei, für die bessere Darstellung versetzte Rauheitsprofile gezeigt.

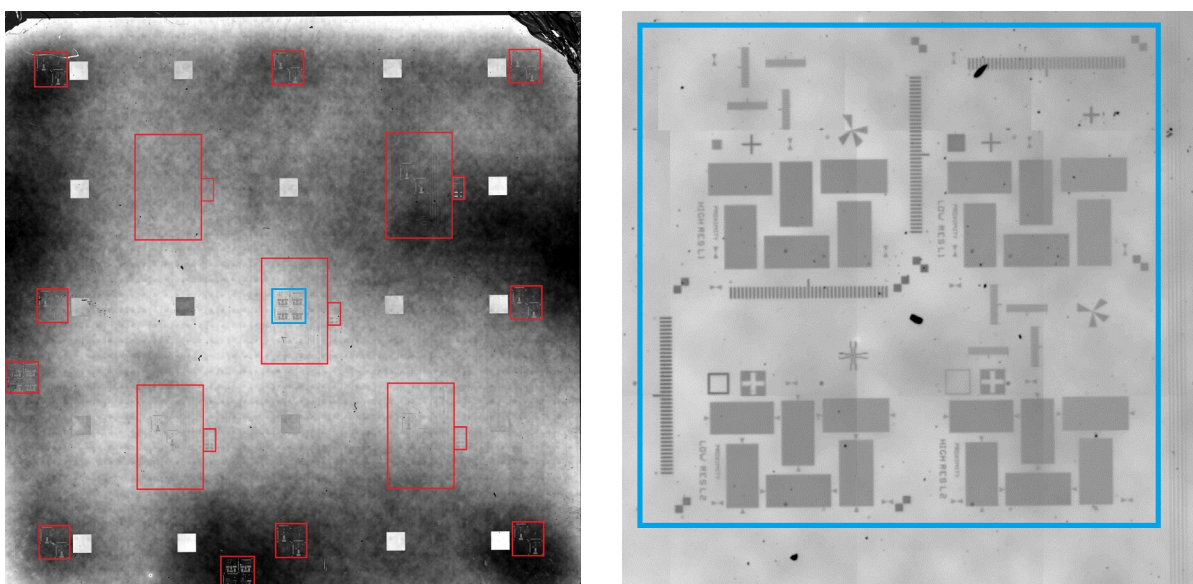
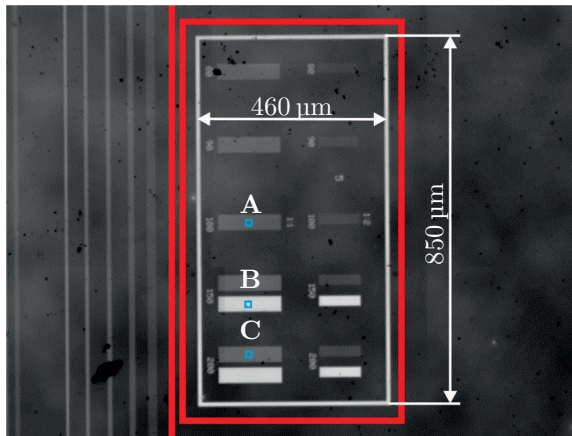
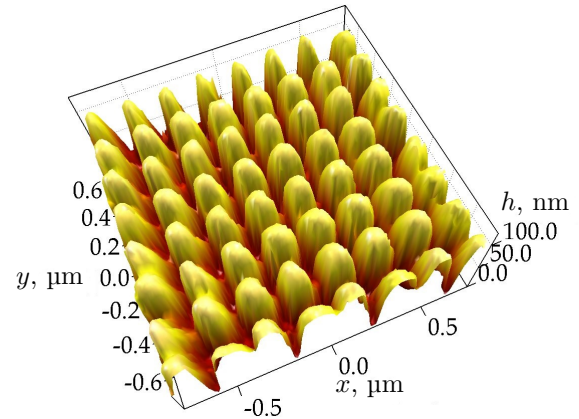
(a) 25 mm \times 25 mm Übersichtsbild(b) 1,2 mm \times 1,2 mm Bereich des Übersichtsbildes mit Strukturen

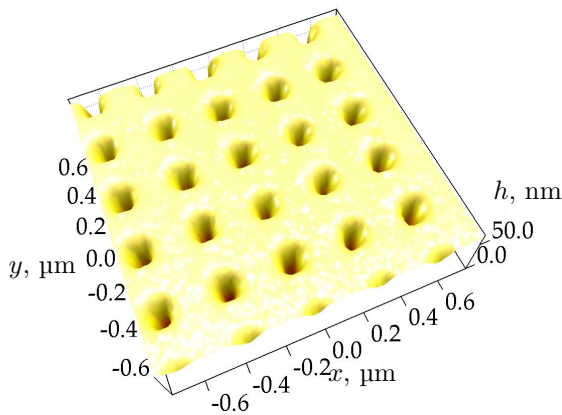
Abbildung 9.10: Der strukturierte Wafer



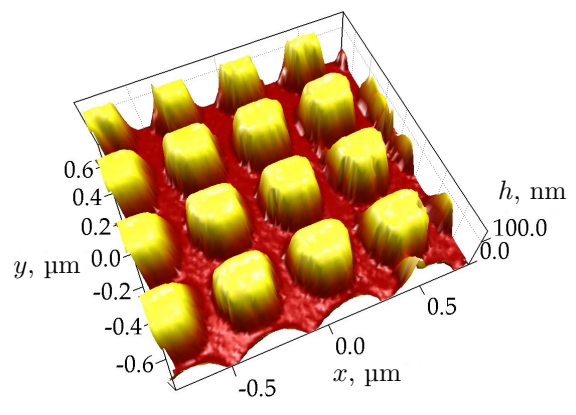
(a) strukturierter Bereich des Wafers



(b) Struktur A



(c) Struktur B



(d) Struktur C

Abbildung 9.11: Gemessene Strukturen eines Wafers (vgl. Abbildung 9.10(a))

Ein Scan innerhalb des gesamten Bewegungsbereiches der NMM-1 mit einem Messpunktabstand von 5 nm würde fast 200 Jahre dauern und ca. 3 PB Speicher brauchen. Die Übersichtsscans mit großem Messpunktabstand können in einigen Fällen bei der Orientierung auf der Oberfläche des Messobjektes helfen, jedoch dauern solche Messungen oft zu lange. Außerdem können in Abhängigkeit von der Oberflächentopographie Aliasing-Effekte auftreten. Eine Lösung bietet die Einbeziehung des Mikroskopkamarasystems des LiAFM (vgl. Abschnitt 6.3, S. 62) zur Orientierung auf dem Messobjekt [132, 135]. Innerhalb des kompletten Messbereiches der NMM-1 wurden die Oberflächenbilder mittels einer FireWire-Kamera des Mikroskopkamarasystems aufgenommen, wobei die Maschine dabei die Positionsbewegungen durchführte. Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. ZBS wurden mittels automatisierter Stitchingverfahren alle korrigierten Aufnahmen innerhalb des Messbereiches in ein Übersichtsbild zusammengefügt (vgl. Abbildung 9.10(a)). Bei einer Pixelauflösung von $0,5\,\mu\text{m}$ erreicht das Übersichtsbild eine Größe von 2,6 GPixel. Die Bilddatei wurde ins GeoTIFF-Format [182] konvertiert, um eine Verknüpfung mit dem Koordinatensystem der NMM-1 zu ermöglichen und die Orientierung in deren Messbereich zu gewährleisten [135]. Im nächsten Schritt wurden durch eine automatische Segmentierung zusammenhängende Regionen des Übersichtsbildes

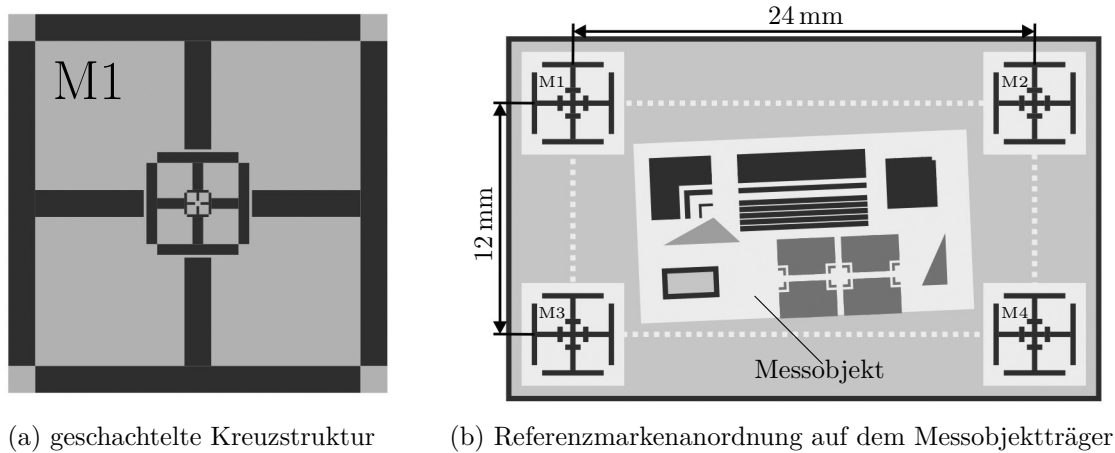


Abbildung 9.12: Entwurf der Referenzmarken

separiert und die interessanten Messbereiche nach vorgegebenen Merkmalen selektiert (vgl. Abbildung 9.10) [135]. Die ausgesuchten Bereiche wurden dann gezielt mittels des LiAFM hochauflösend gemessen (vgl. Abbildung 9.11) [223].

Ein weiteres repräsentatives Beispiel der Langstreckenmessungen ist die Bestimmung von Lage und Entfernung zwischen den Strukturen. Solche Strukturen sind die Mess- und Referenzmarken zur Navigation über große Bereiche und zum Einmessen der Tastelemente unterschiedlicher Tastsysteme [209]. Die im Rahmen des SFB 622 entwickelten Referenzmarken sind mit unterschiedlichen Tastsystemen wie AFM, Fokussensor und Weißlichtinterferometer messbar, sowie im Kamerasystem des LiAFM sichtbar. Die Referenzmarken sollen die genaue Bestimmung der Position des Antastelementes (der Antastspitze) ermöglichen [140, 224] und die Fortsetzung der AFM-Messung nach einem Sondenwechsel erlauben. Besonders gut geeignet sind Kreuzstrukturen [52, 219, 224]. Als Bezugspunkt kann z. B. der (virtuelle) Mittelpunkt der Kreuzstruktur (vgl. Abbildung 9.12(a)) dienen. Eine der wesentlichen Anforderungen an solche Referenzmarken ist die Geradheit und Gleichmäßigkeit der Flanken der Kreuzstrukturen. Die entwickelten Referenzmarken bestehen aus verschachtelten ca. 150 nm tiefen Kreuzstrukturen unterschiedlicher Größe von $40\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$ bis $800\text{ }\mu\text{m} \times 800\text{ }\mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 9.12(a)). Die größten Kreuze dienen dabei zur Navigation mittels Kamerasystem. Die vorgeschlagenen Referenzmarken befinden sich am Rande eines Messobjekthalters bzw. Wafers, so dass die Abstände zwischen ihnen jeweils 12 mm und 24 mm betragen (vgl. Abbildung 9.12(b)). Für das Einmessen der Tastelemente des Antastsystems sind mindestens zwei Bezugspunkten bzw. zwei Referenzmarken erforderlich.

Für die Bestimmung der Bezugspunkte bzw. der Mittelpunkte der Kreuze kann die neue sogenannte “Feature-orientierte Messstrategie” [187] angewendet werden. Mit ihr sind keine Flächenscans, sondern nur vier Linienscans jeweils über eine andere Flanke des Kreuzes erforderlich (vgl. Abbildung 9.13(a)). Das ist eine der Hauptvorteile der Kreuzstrukturen gegenüber anderen Referenzstrukturen, z. B. kreisförmigen Referenzmarken [203]. Jede gemessene Linie beinhaltet eine Rille (vgl. Abbildung 9.13(b)). Zuerst wurde die Rille

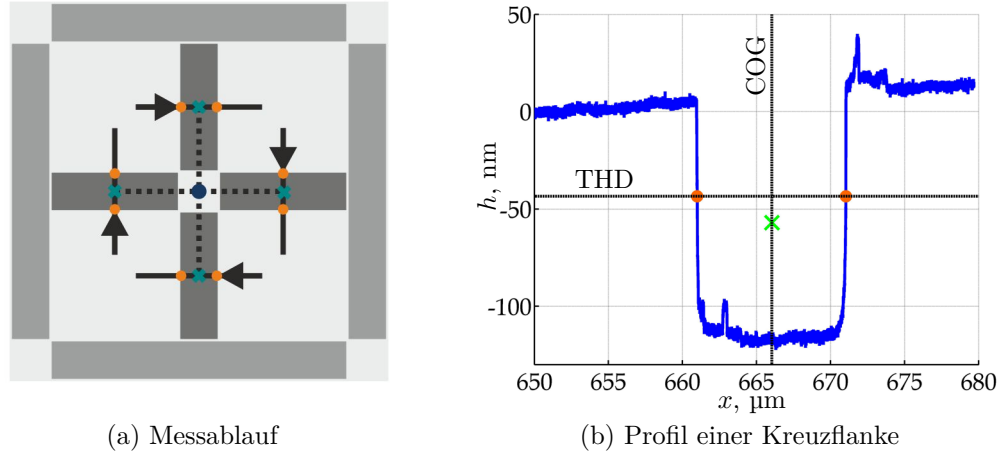


Abbildung 9.13: Bezugspunktbestimmung

durch einen vordefinierten Schwellenwert THD begrenzt. Danach erfolgt die Berechnung der Rillenposition nach der COG Methode. Der Schwerpunkt \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} (\bar{h}) einer homogenen, durch die Linie begrenzten Fläche A , kann mittels Flächenintegral berechnet werden [141]:

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \int x \, dA, \quad \bar{y} = \frac{1}{A} \int y \, dA, \quad \bar{z} = \frac{1}{A} \int z \, dA. \quad (9.2)$$

Die durch die Schwelle THD begrenzte Linie beinhaltet n Messpunkte mit den Koordinaten x_i , y_i , z_i (h_i) ($i = 1 \dots n$). Die Messpunktkoordinaten x_i bzw. y_i werden während des Scans in x - oder y -Richtung äquidistant aufgenommen, so dass $x_{i+1} - x_i = \text{const}$ bzw. $y_{i+1} - y_i = \text{const}$ ist. Folglich können die Integrale der Gleichung (9.2) vereinfacht numerisch berechnet werden:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i (x_i \cdot z_i)}{\sum_i z_i} \quad \text{oder} \quad \bar{y} = \frac{\sum_i (y_i \cdot z_i)}{\sum_i z_i}. \quad (9.3)$$

Aus jeweils vier kalkulierten Rillenpositionen wird das Zentrum der Kreuzstrukturen ermittelt (vgl. Abbildung 9.13(a)). Jede der vier Referenzmarken wurde nacheinander angefahren, vermessen und die Mittelpunkte beider ($40 \, \mu\text{m} \times 40 \, \mu\text{m}$ und $200 \, \mu\text{m} \times 200 \, \mu\text{m}$) Kreuzstrukturen ermittelt. Der Messvorgang wurde 25 Mal (an gleichen Stellen) wiederholt. Die Standardabweichung der berechneten Positionen der Bezugspunkte beläuft sich auf 5 nm [219, 224] (bzw. die erweiterte Messunsicherheit U auf 2 nm, $k=2$) und die Standardabweichung der Abstände zwischen den Bezugspunkten unterschiedlicher Referenzmarken auf 6 nm [219] (bzw. die erweiterte Messunsicherheit U auf 2,4 nm, $k=2$). Die Qualität einer Referenzmarke wurde durch Messungen mit dem Fokussensor an unterschiedlichen Stellen der Flanken untersucht. Die erweiterte Unsicherheit U der berechneten Kreuzmittelpunkten über 51 Messungen ist $<3 \, \text{nm}$ ($k=2$) und die Streuung der Mittelpunkte beträgt ca. 40 nm.

9.4 Kugeloberflächen

Das LiAFM wurde auch zur Vermessung von gekrümmten Oberflächen eingesetzt. Eine der Aufgaben war die Bestimmung der Rauheit von Rubin- (vgl. Abbildung 9.14(a)) und SiN-Antastkugeln (vgl. Abbildung 9.14(b)) eines 3D-Tasters. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte in Zusammenarbeit mit dem ZBS. Die beiden Antastkugeln mit einem nominalen Radius r von $500\text{ }\mu\text{m}$ wurden im CM gescannt. Allerdings ist der Messbereich durch die Wölbung der Antastkugel sowie durch die Lage und Abmessungen der AFM-Sonde begrenzt. Um den Abbruch bzw. die Beschädigung des *Cantilever* zu vermeiden, soll die Scanfläche nicht $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ überschreiten sowie der Pol der Antastkugel sich in der Mitte des Messbereiches befinden. Der Messbereich bei der Rubin-

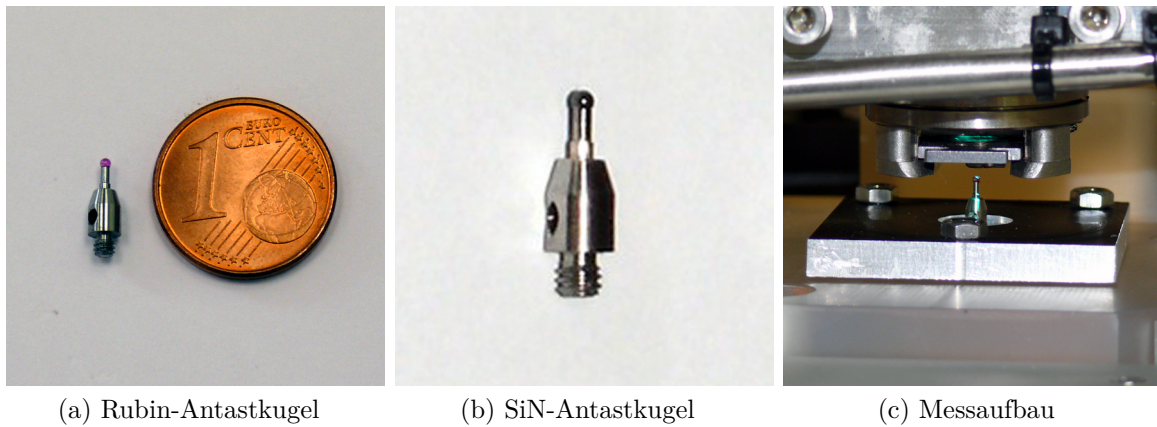


Abbildung 9.14: AFM-Messung von Kugeloberflächen

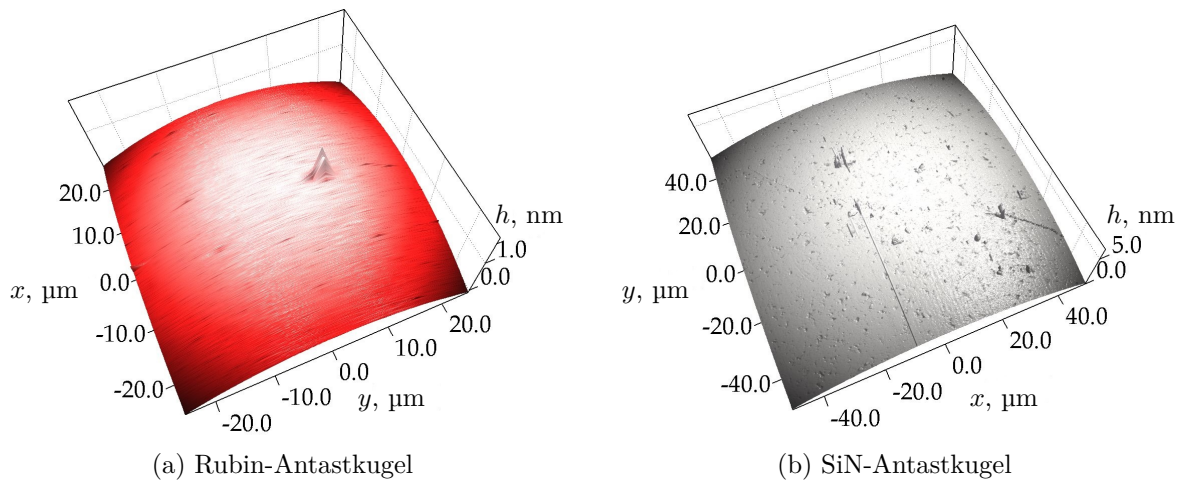
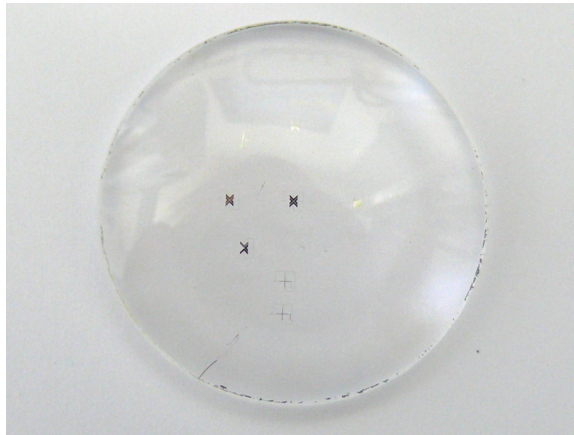


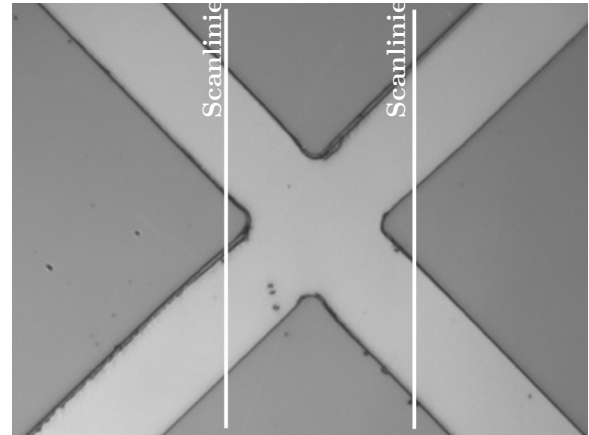
Abbildung 9.15: Messungen der Antastkugeln

	R_a , nm	R_z , nm	RMS, nm
Rubin	2,01	12,51	19,78
SiN	3,54	33,64	38,76

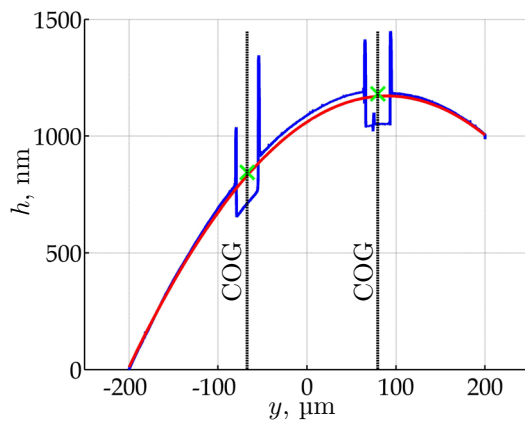
Tabelle 9.3: Auswertung der Kugelmessungen



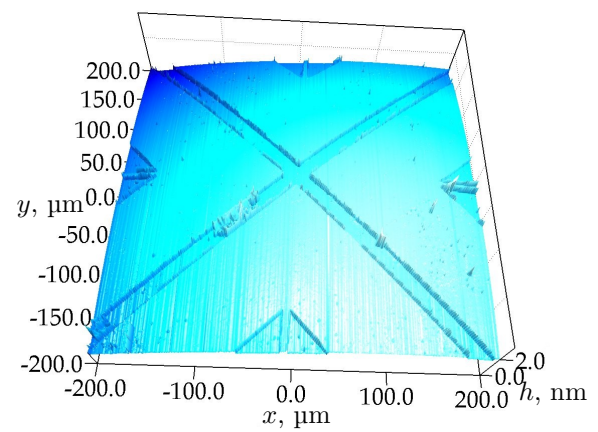
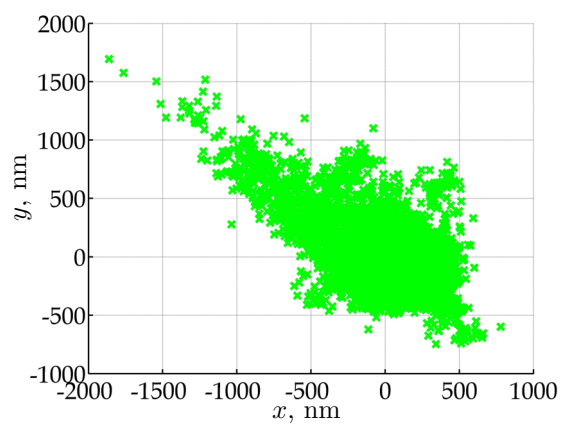
(a) Asphäre mit den Referenzmarkierungen



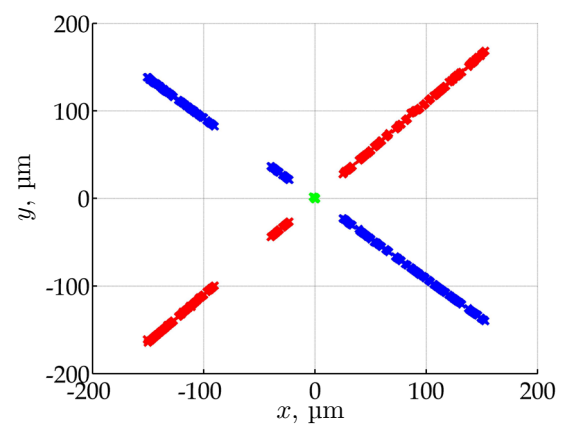
(b) Detailaufnahme der Referenzmarke und Messablauf



(c) gemessenes Profil der Referenzmarke (b)

(d) $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ Scan der Referenzmarke (b)

(e) berechneter Mittelpunkt aus den Flankenpositionen (f)



(f) berechnete Flankenpositionen der gescannten Referenzmarke (d)

Abbildung 9.16: Messung der Testmarkierungen auf der gekrümmten Oberfläche

	x	y	z
s , nm	282,5	275,8	7,5
U , nm	3	3	0,1

Tabelle 9.4: Die Standardabweichungen s und erweiterten Messunsicherheiten U ($k=2$) der Position des Kreuzzentrums

Antastkugel betrug $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$, es wurden 26 Linien mit einem Messpunkt Abstand von 10 nm gescannt (vgl. Abbildung 9.15(a)). Die SiN-Antastkugel wurde über $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ mit einem Linienabstand von 200 nm und einem Messpunkt Abstand von 10 nm gescannt (vgl. Abbildung 9.15(b)). Die erzielte Ergebnisse der Kugelmessungen (arithmetische Mittenrauwert R_a , gemittelte Rautiefe R_z und RMS-Fehler der Regressionsfunktion bzw. RMS der Residuen) sind in Tabelle 9.3 zusammengefasst.

Ein anderes Messobjektbeispiel aus der Kugelflächen- und ebenfalls Referenzmarkenmessung zeigt Abbildung 9.16 [137, 158]. Im Rahmen eines EU Projektes wurde eine an der TU Ilmenau, mittels scannender Lithographie, auf einer Asphäre mit einem Scheitelradius von 34,5 mm, hergestellten Referenzmarke (vgl. Abbildungen 9.16(a) und (b)) untersucht. Abbildung 9.16(d) stellt den im dynamischen Betrieb IM gescannten Bereich von $400\text{ }\mu\text{m} \times 400\text{ }\mu\text{m}$ der zentralen Referenzmarke dar. Der Messpunkt Abstand sowie der Abstand zwischen den Scanlinien betrugen entsprechend 4 nm und 800 nm. Bei den gemessenen Profilen wurden jeweils zwei Flankenpositionen mittels der in Abschnitt 9.3 beschriebenen COG Methode berechnet (vgl. Abbildung 9.16(c)). Zwischen den jeweils zwei, an unterschiedlichen Seiten bezüglich des Kreuzzentrums, ermittelten Positionen einer Flanke (vgl. Abbildung 9.16(f)) wurden Geraden gelegt. Aus dem Schnittpunkt von zwei Geraden unterschiedlicher Flanken ergibt sich die x - y -Position des Kreuzzentrums (vgl. Abbildungen 9.16(e) und (f)). Insgesamt wurden 8586 x - y -Positionen ermittelt. Die z -Position kann nach einer Regression der Kugeloberfläche über die vier Flankenpositionen berechnet werden. Die Standardabweichungen und die erweiterten Messunsicherheiten der ermittelten x - y - z -Position des Kreuzzentrums sind in der Tabelle 9.4 zusammengefasst.

9.5 Hochgeschwindigkeitsmessungen

Zunehmend gewinnen Hochgeschwindigkeitsmessungen an Bedeutung. Diese Messungen waren bisher nur mit speziell entwickelten AFM mit sehr kleinen Bewegungsbereichen von wenigen μm [2, 229, 230] oder mit den optischen Antastsystemen der NMM-1 [146] möglich. Die Hochgeschwindigkeits-AFM-Messungen wurden erst durch den Einsatz des LiAFM als aktives Antastsystem (vgl. Abschnitt 7.2.3, S. 71) möglich [221].

Zuerst wurde das Leistungsvermögen des passiven und aktiven Tastsystems mit PID- und PI-Regler mit Notchfiltern durch Messungen an unterschiedlich hohen Teststrukturen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten untersucht [221]. Ein Beispiel der Linienscans im CM mit einer Geschwindigkeit von $20\text{ }\mu\text{m/s}$ über ein Messobjekt mit einer Strukturhöhe von 100 nm ist in der Abbildung 9.17 zu sehen. Die Höhe der gemessenen Struktur h (vgl.

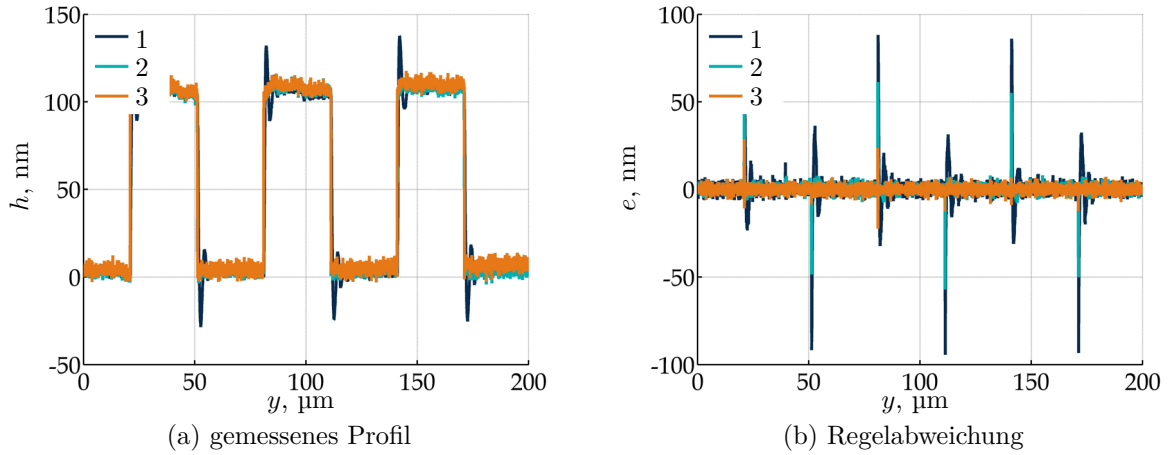


Abbildung 9.17: Linienscans im CM mit einer Geschwindigkeit von $20 \mu\text{m/s}$ (1 PI NMM-1, 2 PI NMM-1 & PID APC, 3 PI NMM-1 & PI mit Notchfiltern APC)

Abbildung 9.17(a)) und die dazugehörigen Regelabweichungen e (vgl. Abbildung 9.17(b)) wurden in Abhängigkeit von der Scanbewegung der NMM-1 (y -Interferometerwert) dargestellt. Als Regelabweichung e wird die Differenz zwischen dem Biegungssignal d_z als Istwert und dem Sollwert $SetPoint\ d_{z,SP}$ bezeichnet. Sie eignet sich am besten für den Vergleich verschiedener Regelsysteme. Die Regelabweichung e des aktiven Tastsystems ist kleiner als bei einem PI-geregelten passiven Tastsystem, wobei die besten Ergebnisse durch Verwendung eines PI-Reglers mit Notchfiltern erreicht werden (vgl. Abbildung 9.17(b)).

Drei ähnliche Strukturen mit unterschiedlichen Höhen von 100, 500 und 1000 nm wurden im CM und IM mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten von 1 bis $200 \mu\text{m/s}$ mit passivem und aktivem Antastsystem wiederholt gemessen. Für jede gescannte Linie wurde die Regelabweichung e sowie deren Standardabweichung $s(e)$ berechnet. In Abbildung 9.18 sind die mittleren Standardabweichungen $s(e)$ in Abhängigkeit von der Messobjekthöhe h und Scangeschwindigkeit v zusammengefasst. In allen Fällen ermöglicht der Einsatz des PI-Reglers mit Notchfiltern schnellere Messungen mit geringeren Regelabweichungen an höheren Strukturen. Die Leistungsfähigkeit dieses neuen Reglers wurde mit den bisherigen Regelungskonzepten (passives Antastsystem) verglichen und eine Verbesserung um den Faktor 5 (CM) bzw. 4,3 (IM) gegenüber dem passiven Tastsystemkonzept festgestellt [221]. Zudem ist die Strukturhöhe des Messobjektes beim Einsatz des LiAFM als passives Tastsystem auf ca. 100 nm begrenzt.

Weiterhin wurde bei Testmessungen im CM an ca. 120 nm hohen Strukturen die Scangeschwindigkeit v bis auf $1000 \mu\text{m/s}$ erhöht [224], wobei die mittlere Standardabweichung der Regelabweichung $s(e)$ von 15 nm nicht überschritten wurde (vgl. Abbildung 9.19). Allerdings führt die Erhöhung der Geschwindigkeit zur Vergrößerung des Messpunktabstandes, sodass bei der Messung mit $v = 1000 \mu\text{m/s}$ der minimale Messpunktabstand 160 nm beträgt. Eine solche hohe Scangeschwindigkeit ist besonders bei Langstrecken- sowie Übersichtsmessungen sinnvoll.

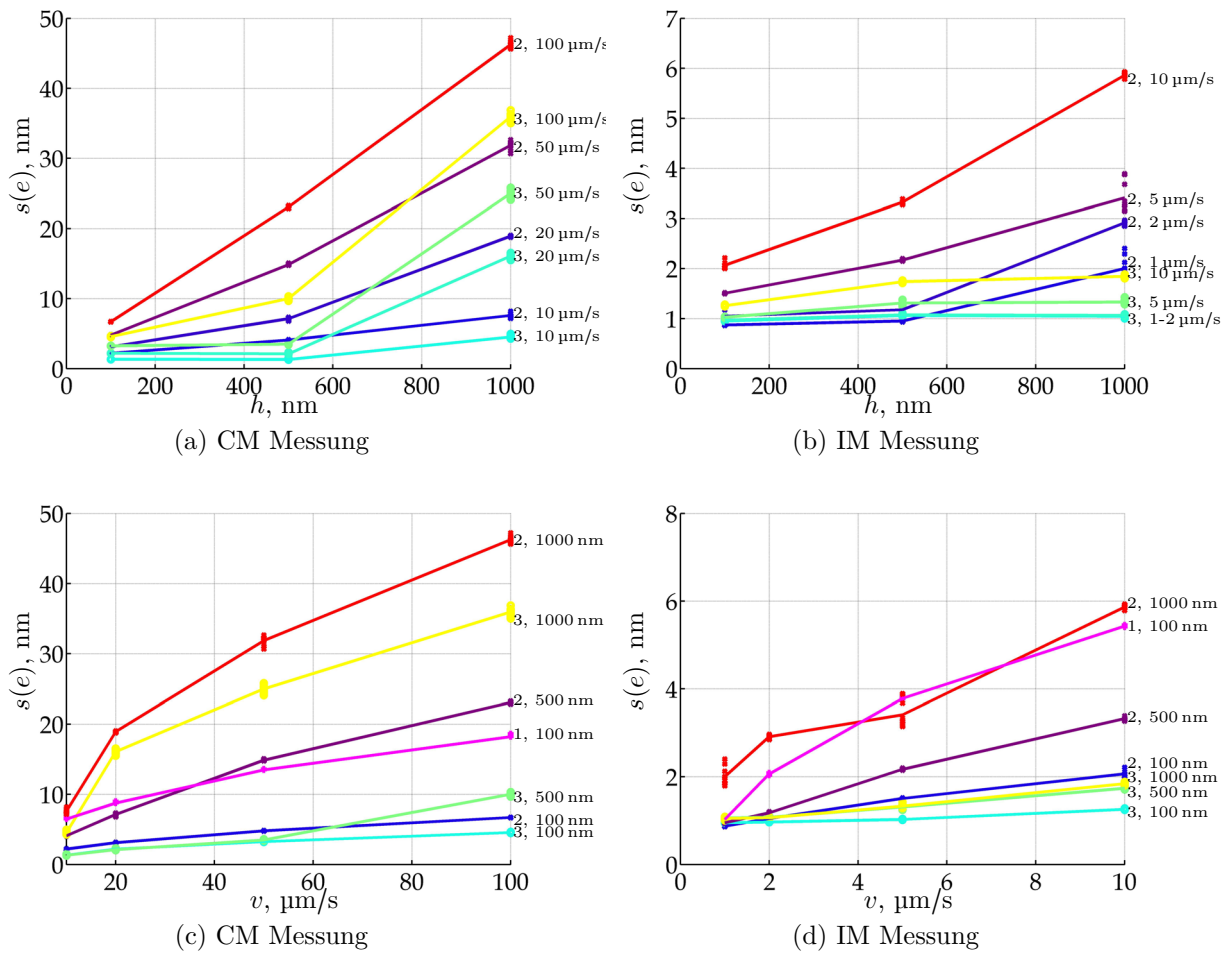


Abbildung 9.18: Die Standardabweichungen s der Regelabweichungen e in Abhängigkeit von der Messobjekthöhe h und Scangeschwindigkeit v (1 PI NMM-1, 2 PI NMM-1 & PID APC, 3 PI NMM-1 & PI mit Notchfiltern APC)

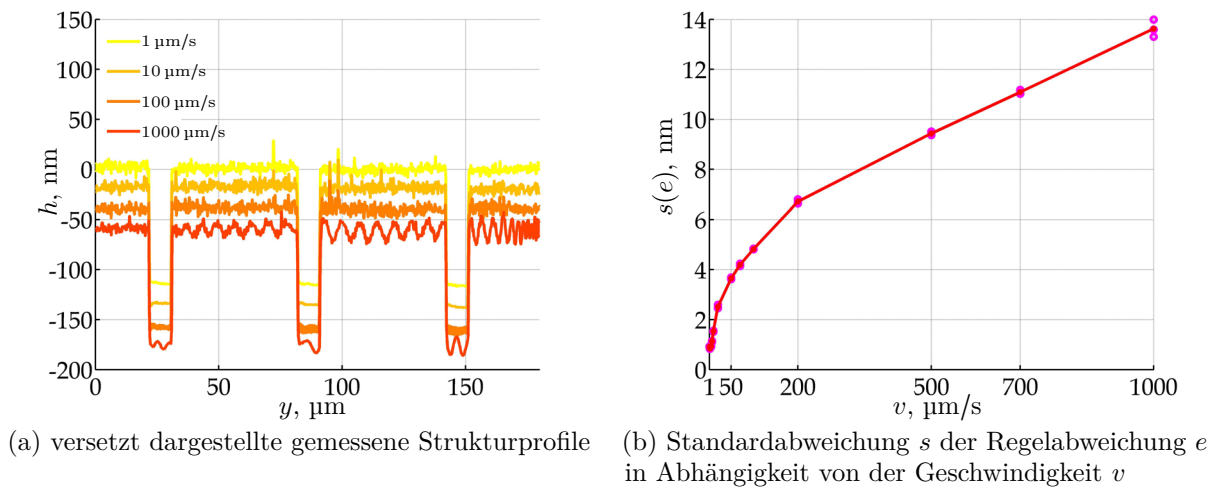


Abbildung 9.19: Untersuchungen zur Erhöhung der Scangeschwindigkeit

10 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurde ein neuentwickeltes laserinterferometrisches Rasterkraftmikroskop (LiAFM), welches als Antastsystem in der NMM-1 dient, vorgestellt. Das Hauptmerkmal des LiAFM ist das kombinierte Sondenmesssystem, dass die gleichzeitige Erfassung der Torsion, Biegung und Position der Sonde mittels Lichtzeigers und Interferometers ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden wesentliche Beiträge zum Entwurf und Aufbau dieses kombinierten Sondenmesssystems geleistet.

Für die Konzipierung des LiAFM wurde zuerst der Stand der Technik und Wissenschaft analysiert sowie die Grundlagen der Rasterkraftmikroskopie erläutert. Dafür wurde eine Übersicht kommerzieller und metrologischer Geräte erstellt und die Hauptkomponenten eines Rasterkraftmikroskops mit Sonde, Rastereinheit und Lagedetektor (inklusive Lichtzeiger und Interferometer) erklärt. Außerdem wurden die Wechselwirkungskräfte zwischen Antastspitze und Messoberfläche und die daraus folgenden Betriebsarten erläutert.

Im Kapitel 5 wurde das interferometrische Sondenmesssystem als Lagedetektor des LiAFM detailliert dargestellt. Zuerst wurde das Prinzip der gleichzeitigen Erfassung von Position und Winkellage der Sonde mittels eines Interferometers und eines Lichtzeigers erläutert. Die umfassende Dimensionierung des interferometrischen Sondenmesssystems und die Erarbeitung dessen optischer Anordnung schließen das Kapitel ab.

Das nachfolgende Kapitel 6 widmet sich dem mechanischen Aufbau des LiAFM. Ausgehend von der im Kapitel 5 vorgeschlagenen optischen Anordnung wurde der Aufbau und die Justage des Sondenmesssystems dargestellt. Weiterhin wurden die unterschiedlichen Anordnungen des Halterungs- und Justageelementes zur Aufnahme des *Cantilevers* dargelegt, sowie die Dimensionierung und das Anbringen des Mikroskopkameranystems dargestellt.

Die mechanische und elektrische Einbindung des LiAFM in die NMM-1 wurden im Kapitel 7 erklärt. Weiterhin wurde das Betreiben des LiAFM als aktives Antastsystem für Hochgeschwindigkeitsmessungen erläutert und das speziell für diesen Zweck, im Rahmen mehrerer studentischer und wissenschaftlicher Arbeiten entwickelte, Messdatenerfassungs- und -verarbeitungssystem APC vorgestellt. Dieses Kapitel widmet sich auch der Kalibrierung des LiAFM für die Messungen im *Contact*-Modus (CM) und *Intermittent*-Modus (IM). Darüber hinaus wurde die Vorgehensweise bei der Berechnung der Kalibrier- bzw. Polynomkoeffizienten und deren Unsicherheiten sowie die Initialisierung des LiAFM für die Messungen mit der NMM-1 erklärt.

Im Kapitel 8 wurden die messtechnische Eigenschaften des LiAFM untersucht. Das interferometrische Sondenmesssystem wurde zuerst separat betrachtet. Dazu wurden insbesondere die Umweltabhängigkeit der interferometrischen Positionsmessung theoretisch analysiert und umfangreiche Messungen durchgeführt. Anschließend wurde das Gesamtsystem – NMM-1 mit integriertem LiAFM analysiert. Es wurden Untersuchungen zu der Umweltabhängigkeit und Langzeitstabilität des LiAFM durchgeführt. Mittels zahlreicher aufeinanderfolgender Messungen wurde die Wiederholbarkeit der Kalibrierkennlinien un-

tersucht. Da die Kenntnis der Form der Antastspitze und deren Veränderung während der Scanmessung für die Interpretation der Messergebnisse von Bedeutung sind, wurden geeignete Methoden zur Bestimmung der Spitzenform vorgeschlagen und eine Empfehlung zur Auswahl geeigneter Sonden und optimaler Scanparameter in Hinsicht auf Langstreckenmessungen erarbeitet. Als besonders geeignet erwies sich dabei der Charakterisierer mit Strukturen in Spitzenform. Eine Sonde mit einer sehr dünnen und langen kegelförmigen Spitze ermöglicht, trotz Verschleiß Messungen mit einer hohen lateralen Auflösung durchzuführen. Während der Messungen soll die Messkraft nur so hoch eingestellt werden, bis ein sicherer Kontakt mit der Messobjektoberfläche erreicht wird. Außerdem sollte die Scangeschwindigkeit nicht zu gering ausgewählt werden und die Anzahl der Antast- und Kalibriervorgänge ist möglichst gering zu halten.

Abschließend wurde in diesem Kapitel die Unsicherheitsanalyse einer Beispielmessung durchgeführt. Dabei wurden kombinierte Unsicherheiten, zum Vergleich, mit und ohne Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur für unterschiedlichen Messbedingungen (Kurzzeit- und Langzeitmessung, mit und ohne Temperierung) anhand der selben Modellgleichung und Messdaten berechnet. Während der Kurzzeitmessungen beläuft sich die berechnete kombinierte Standardunsicherheit auf 6 nm. Es zeigte sich, dass während der Kurzzeitmessung weder die Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur noch das Anschalten der Temperierung notwendig sind. Während der Langzeitmessung ist es empfehlenswert, die Umweltparameter, insbesondere den Luftdruck, aufzuzeichnen, um die Brechzahländerungen und deren Einfluss auf die Totstrecke nachträglich zu korrigieren.

Im Kapitel 9 wurden die wichtigsten Messaufgaben des LiAFM dargestellt. Hierzu zählen in erster Linie Messungen von Kalibrierstrukturen wie z. B. Stufenhöhennormale und Gitterstrukturen. Dabei stimmen die ermittelten Stufenhöhen mit den zertifizierten Kalibrierwerten der PTB im Rahmen der angegebenen erweiterten Messunsicherheiten überein. Die Messungen von Gitterstrukturen zeichnen sich durch eine sehr hohe Wiederholbarkeit aus. Die maximale ermittelte erweiterte Messunsicherheit beläuft sich auf 0,03 nm. Mit dem LiAFM wurden auch Hochgeschwindigkeitsmessungen mit einer Scangeschwindigkeit von 1000 $\mu\text{m/s}$ durchgeführt. Weiterhin wurden solche anspruchsvollen Aufgaben wie Kugeloberflächen- und Langstreckenmessungen, in deren Rahmen spezielle intelligente Messstrategien entwickelt wurden, erläutert. Ziel der intelligenten Messstrategien ist es, Messstrecken und -zeiten zu reduzieren. Dies wurde durch die Einbeziehung des Mikroskopkamarasystems für Übersichtsbilder und gezielter Messung der Bereiche mit Strukturen, Anwendung von speziell entwickelten Messalgorithmen sowie der Erhöhung der Scangeschwindigkeit realisiert. Eine weitere Möglichkeit zur Messstrecken- und -zeitreduzierung ist die Anwendung mäander-, spiral- oder kreisförmiger (konzentrische Kreise) Scans anstelle von einfachen Messungen (Linienscans) vorwärts und rückwärts. Die ersten Untersuchungen der intelligenten Scanstrategien wurden im Rahmen eines EU Projektes durchgeführt [223]. Abbildung 10.1 zeigt ein Vergleich eines mäander- und kreisförmigen Scans. Die gleich großen Messfelder wurden an derselben Stelle mit gleichem

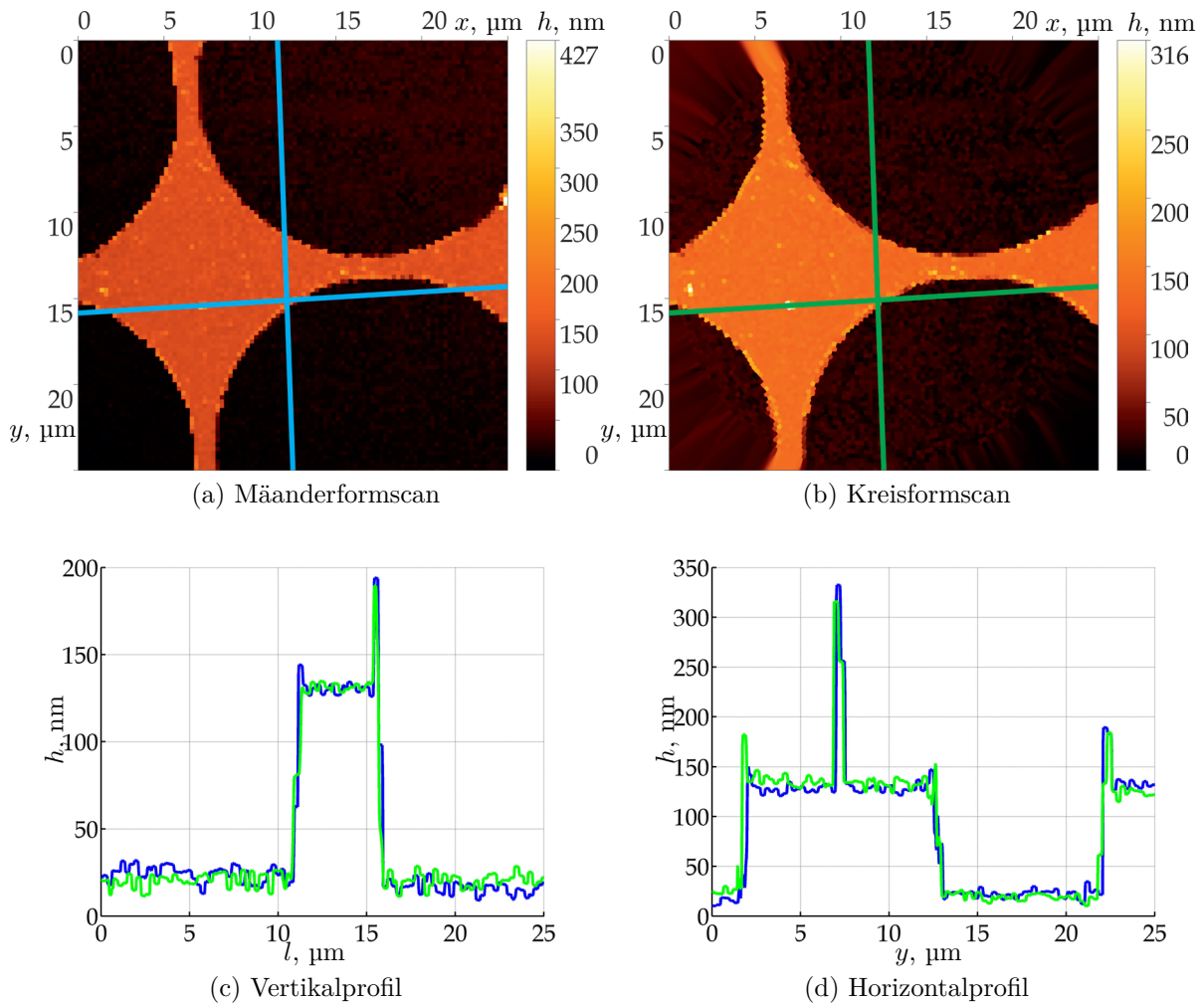


Abbildung 10.1: Vergleich eines mäander- und kreisförmigen Scans

Messpunktabstand und gleicher Bahngeschwindigkeit gescannt. Dabei ist der Kreisformscan ca. 1,5 Mal schneller als der Mäanderformscan. Die Arbeiten an intelligenten Messstrategien sollten in jedem Fall, insbesondere nach der Implementierung neuer Scanbefehle in die NMM-1-Software, fortgesetzt werden.

Mit der Entwicklung und dem Aufbau des LiAFM wurde ein Antastsystem für die NMM-1 geschaffen, das sehr gute messtechnische Eigenschaften aufweist und wiederholbare Hochgeschwindigkeits-AFM-Messungen ermöglicht. Das LiAFM kann für sehr unterschiedliche Messaufgaben inklusive Stufenhöhen- und Gitterabstandsmessungen sowie Langstreckenmessungen eingesetzt werden.

Zur Zeit erobert sich die Rasterkraftmikroskopie ein neues aussichtsreiches Einsatzgebiet: die spitzenbasierte Nanofabrikation. Es werden Verfahren entwickelt, um mit Hilfe von Wechselwirkungen zwischen einer Antastspitze und einer speziell modifizierter Oberfläche Nanostrukturen zu erzeugen [214]. Eine Weiterentwicklung und Modifizierung der Sondaufnahme (bzw. der Sondenhalterung) des LiAFM ermöglicht die Herstellung von kleinsten Strukturen mittels spitzenbasierter Nanofabrikation innerhalb des Bewegungsbereiches der NMM-1. Nach ersten Voruntersuchungen [109, 111] wurde eine weitere Sondaufnahme des LiAFM für die spitzenbasierte Nanofabrikation entwickelt und aufgebaut [26]. Abbil-

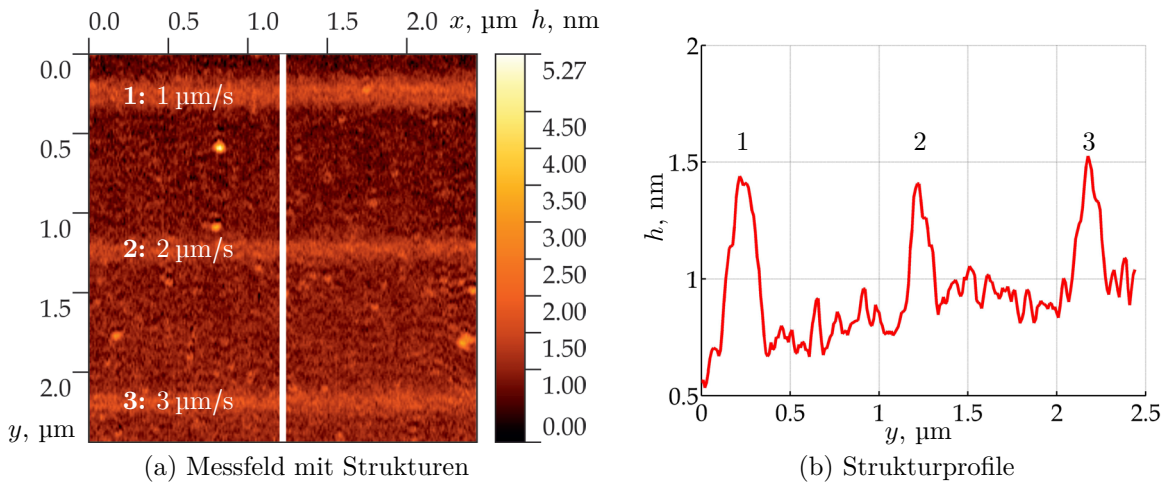


Abbildung 10.2: Durch Oxidationslithographie hergestellte Strukturen

dung 10.2 zeigt mittels Oxidationslithographie (induzierte lokale anodische Oxidation) hergestellte Teststrukturen [109]. Die Grundlage für die spitzenbasierte Nanofabrikation mit dem LiAFM wurde in dieser Arbeit geschaffen. Das LiAFM kann somit auch an dem im Jahr 2017 an der TU Ilmenau eröffneten Graduiertenkolleg “Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen” (NanoFab) Einsatz finden. Der Ansatz der Nanofabrikation mit dem LiAFM sollte weiter verfolgt werden.

Ein Gegenstand zukünftiger Arbeiten wäre die Untersuchung zur Verringerung der Messunsicherheit der Langzeitmessungen des LiAFM. Es soll die Möglichkeit der Angleichung von optischen Wegen im Mess- und Referenzarm des Interferometers des Sondenmesssystems in Betracht gezogen werden. Durch Integration eines Glaskörpers mit entsprechenden Eigenschaften in den Referenzarm des Interferometers wird zwar die umweltabhängige Totstrecke eliminiert, allerdings können die zusätzlichen optischen Bauelemente die Messsignale des Sondenmesssystems beeinflussen. Es sollen umfangreiche Untersuchungen anhand eines Testaufbaus durchgeführt werden. Zur Unsicherheitsanalyse von LiAFM Messungen selbst sollen weitere Ansätze in Betracht gezogen werden. Beispielweise empfiehlt sich aufgrund der sehr komplexen Abhängigkeit des Messergebnisses von den Umweltparametern die Monte-Carlo-Methode. Diese Methode ist auf nichtlineare Modelle anwendbar. Auch entfällt die Notwendigkeit der Ermittlung von Sensitivitätskoeffizienten. Bei diesem Verfahren werden die Eingangsgrößen zugleich entsprechend ihren Verteilungen statistisch simuliert und die Verteilung der Ausgangsgröße über die Modellgleichung berechnet. Im Rahmen des SFB 622 wurde die Monte-Carlo-Methode zur Berechnung der kombinierten Messunsicherheit der NMM-1 angewendet [63] und allmählich das metrologische Modell der Maschine auch für den Einsatz mit den Antastsystemen erweitert. Es wurde ein sehr vereinfachtes Teilmodell des LiAFM für die Monte-Carlo-Simulation aufbereitet und die Verteilungen der Eingangsgrößen mit Zufallsgeneratoren nachgebildet [122]. Dieses Modell kann erweitert werden und als Grundlage für eine weitere umfangreiche Unsicherheitsanalyse des LiAFM dienen.

Literaturverzeichnis

- [1] ALBRECHT, T. ; GRITTER, P. ; HORNE, D. ; RUGAR, D. : Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity. In: *J. Appl. Phys.* 69 (1991), S. 668–673
- [2] ANDO, T. : High-speed atomic force microscopy coming of age. In: *Nanotechnology* 23 (2012), Nr. 6, S. 062001–1–27. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/23/6/062001>. – DOI 10.1088/0957-4484/23/6/062001
- [3] ANSELMETTI, D. ; GERBER, C. ; MICHEL, B. ; GTINTHERODT, H.-J. ; ROHRER, H. : Compact, combined scanning tunneling/force microscope. In: *Rev. Sci. Instrum.* 63 (1992), S. 3003–3006
- [4] ARMINGER, B. ; ADAMSMAIR, S. ; KIENBERGER, F. ; P. HINTERDORFER, B. Z.: Piezo-Aktoren und -Sensoren in der Rastersondenmikroskopie Piezo actuators and sensors in scanning probe microscopy. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* 125 (2008), März, Nr. 3, S. 86–91
- [5] *attocube systems AG*. <http://www.nanopositioning.org/index.htm>. – Stand: Oktober 2016
- [6] BAIBYRIN, V. B. ; KONNOV, N. P. ; VOLKOV, U. P.: Improved optical method for measuring of AFM cantilever deflection. In: *Proc. of the SPIE* 3261 (1998), S. 187–192
- [7] BALCON, M. ; MARINELLO, F. ; SAVIO, E. ; CARMIGNATO, S. : Thermal Drift study on SPMs. In: *Proceedings of the euspen 10th International Conference* Bd. 1, 2010, S. 209–211
- [8] BALZER, F. G. ; HAUSOTTE, T. ; DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), S. 094018–1–7. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094018>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/9/094018
- [9] BALZER, F. G.: *Aufbau und Untersuchung eines interferenzoptischen 3-D-Tasters*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Dezember 2008
- [10] BÜCHNER, H. ; JÄGER, G. : Interferometrisches Meßverfahren zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Meßoberflächen (Interferometric measuring technique for the contactless and quasi-pointlike scanning of measuring surfaces). In: *Technisches Messen* 59 (1992), S. 43–46
- [11] BÜCHNER, H. ; JÄGER, G. ; GERHARDT, U. ; HASCHKE, K. : Entwicklung eines 3D-laserinterferometrischen Nanomesssystems für den Abbé-fehlerfreien Einbau in Rasterkraftmikroskope. In: *Technisches Messen* 66 (1999), Nr. 12, S. 504–510
- [12] BÜCHNER, H.-J. ; JÄGER, G. : A novel plane mirror interferometer without using corner cube reflectors. In: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), S. 746–752
- [13] BEECK, M.-A. ; ENGELSBERGER, J. ; BIMBERG, D. (Hrsg.): *Meßtechniken mit Lasern*. Expert-Verlag, 1993

- [14] BHATIA, A. ; CLEMNOW, P. ; GABOR, D. ; STOKES, A. ; TAYLOR, A. ; WAYMAN, P. ; WILCOCK, W. ; BORN, M. (Hrsg.) ; WOLF, E. (Hrsg.): *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. sixth (corrected) edition. Pergamon Press, 1989
- [15] BHUSHAN, B. (Hrsg.): *Springer Handbook of Nanotechnology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [16] BIENIAS, M. ; GAO, S. ; HASCHE, K. ; SEEMANN, R. ; THIELE, K. : A metrological scanning force microscope used for coating thickness and other topographical measurements. In: *Appl. Phys. A* 66 (1998), S. 837–842
- [17] BINNIG, G. ; QUATE, C. ; GERBER, C. : Atomic Force Microscope. In: *Physical Review Letters* 56 (1986), S. 930–934
- [18] BINNIG, G. ; ROHRER, H. ; GERBER, C. ; WEIBEL, E. : Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. In: *Physical Review Letters* 49 (1982), S. 57–61
- [19] BINNIG, G. ; ROHRER, H. ; GERBER, C. ; WEIBEL, E. : Tunneling through a controllable vacuum gap. In: *Appl. Phys. Lett.* 40 (1982), S. 178–180
- [20] BINNIG, G. ; SMITH, D. : Single-tube three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy. In: *Review of Scientific Instruments* 57 (1986), S. 1688–1689
- [21] BLANC, N. ; BRUGGER, J. ; ROOIJ, N. de ; DÜRIG, U. : Scanning force microscopy in the dynamic mode using microfabricated capacitive sensors. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 14 (1996), Nr. 2, S. 901–905
- [22] BÖNSCH, G. ; POTULSKI, E. : Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen’s formulae. In: *Metrologia* 35 (1998), S. 133–139
- [23] BOEF, A. den: Scanning force microscopy using a simple low-noise interferometer. In: *Appl. Phys. Lett.* 55 (1989), S. 439–441
- [24] BONNET, N. ; DONGMO, S. ; VAUTROT, P. ; TROYON, M. : A mathematical morphology approach to image formation and image restoration in scanning tunnelling and atomic force microscopies. In: *Microsc. Microanal. Microstruct.* 5 (1994), S. 477–487
- [25] BOSSE, H. ; WILKENING, G. : Dimensionelle Nanometrologie in der PTB – eine Übersicht (Dimensional Nanometrology at PTB – a Survey). In: *Technisches Messen* 73 (2006), S. 4–18
- [26] BOTHE, R.-S. : *Entwicklung einer Sondenaufnahme zum Einsatz in einem Rasterkraftmikroskop für STM-Lithographie*, TU Ilmenau, Diplomarbeit, 2015
- [27] BURNHAM, N. ; BEHREND, O. ; OULEVEY, F. ; GREMAUD, G. ; GALLO, P.-J. ; GOURDON, D. ; DUPAS, E. ; KULIK, A. ; POLLOCK, H. ; BRIGGS, G. : How does a tip tap? In: *Nanotechnology* 8 (1997), S. 67–75
- [28] BUTT, H.-J. ; CAPPELLA, B. ; KAPPL, M. : Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. In: *Surface Science Reports* 59 (2005), S. 1–152
- [29] BYKOV, V. ; GOLOGANOV, A. ; SHEVYAKOV, V. : Test structure for SPM tip shape deconvolution. In: *Appl. Phys. A* 66 (1998), S. 499–502

- [30] BYKOVA, V. : *Entwicklung eines Regelungssystems für aktive 3-D-Tastsysteme*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Juli 2009
- [31] CAPPELLA, B. ; DIETLER, G. : Force-distance curves by atomic force microscopy. In: *Surface Science Reports* 34 (1999), S. 1–104
- [32] *Carpenter Invar 36® Alloy, Cold Drawn Bars*. <http://www.matweb.com>. – Stand: März 2018
- [33] CHANTADA, L. ; KIM, M.-S. ; MANZARDO, O. ; DÄNDLIKER, R. ; AESCHIMANN, L. ; STAUFER, U. ; VETTIGER, P. ; WEIBLEC, K. ; HERZIG, H. P.: Parallel Atomic Force Microscopy using Optical Heterodyne Detection. In: *Proc. of the SPIE* 6186 (2006), S. 61860B–1–61860B–7
- [34] CHEN, C.-J. : *Development of a Traceable Atomic Force Microscope with Interferometer and Compensation Flexure Stage*, Technische Universität Ilmenau, Diss., Mai 2003
- [35] CHEN, C.-J. ; JÄGER, G. ; HOFMANN, N. : Entwicklung eines metrologischen Rasterkraftmikroskops (Development of a Traceable Atomic Force Microscope). In: *Technisches Messen* 69 (2002), S. 483–487
- [36] CHEN, C.-K. ; CHEN, B.-H. ; YANG, Y.-T. : Atomic force microscopy tip noise induced by adhesion, nanoindentation and fracture. In: *Nanotechnology* 15 (2004), S. 1771–1778
- [37] CHEN, S. C. ; LIN, J. F.: Detailed modeling of the adhesion force between an AFM tip and a smooth flat surface under different humidity levels. In: *J. Micromech. Microeng.* 18 (2008), S. 7pp
- [38] CHU, J. ; ITOH, T. ; LEE, C. ; SUGA, T. ; WATANABE, K. : Novel high vacuum scanning force microscope using a piezoelectric cantilever and the phase detection method. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 15 (1997), Nr. 4, S. 1551–1555
- [39] CULPEPPER, M. L. ; ARAQUE, C. ; RODRIGUEZ, M. : Design of accurate and repeatable kinematic couplings. In: *ASPE* (2002), S. 279–284
- [40] DAI, G. ; BÜTEFISCH, S. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. ; KOENDERS, L. : Rastersondenmetrologie: Vom metrologischen Rasterkraftmikroskop zum Mikro- und Nanokoordinatenmessgerät. In: *Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 2, S. 43–53
- [41] DAI, G. ; KOENDERS, L. ; POHLENZ, F. ; DZIOMBA, T. ; DANZEBRINK, H.-U. : Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings. In: *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), S. 1241–1249
- [42] DAI, G. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. ; HASCHKE, K. ; WILKENING, G. : Improving the performance of interferometers in metrological scanning probe microscopes. In: *Meas. Sci. Technol.* 15 (2004), S. 444–450
- [43] DAI, G. ; WOLFF, H. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. : A metrological large range atomic force microscope with improved performance. In: *Rev. Sci. Instrum.* 80 (2009), S. 043702–1–043702–10
- [44] DAI, G. ; WOLFF, H. ; WEIMANN, T. ; XU, M. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. : Nanoscale surface measurements at sidewalls of nano- and micro-structures. In:

- Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 334–341
- [45] DANZEBRINK, H.-U. ; KOENDERS, L. ; WILKENING, G. ; YACOOT, A. ; KUNZMANN, H. : Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology. In: *Annals of the CIRP* 55 (2006), S. 841–878
- [46] DME Nanotechnologie GmbH. <http://dme-spm.de/index.html>. – Stand: Oktober 2016
- [47] DONGES, A. ; NOLL, R. : *Lasermesstechnik. Grundlagen und Anwendungen*. Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 1993
- [48] DONTSOV, D. : *Homodyninterferometer zur berührungslosen Schwingungsanalyse*, Technische Universität Ilmenau, Diss., Mai 2003
- [49] DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; HOFMANN, N. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Development of the interferometrical scanning probe microscope. In: *Proc. of the SPIE* 6293 (2006), S. 629311–1–629311–8
- [50] DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; JÄGER, G. ; MANSKE, E. : Application of the metrological scanning probe microscope for high-precision, long-range, traceable measurements. In: *Proc. of the SPIE* 6616 (2007), S. 661624–1–661624–7
- [51] DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. ; HOFMANN, N. : Metrological scanning probe microscope. In: *Proc. of the SPIE* 6188 (2006), S. 61880L–1–61880L–8
- [52] DOROZHOVETS, N. ; MACHLEIDT, T. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; FRANKE, K.-H. ; JÄGER, G. : Metrological scanning probe microscopy for long-range traceable measurements. In: *Seeing at the Nanoscale VI an international conference* (2008), July, S. 17
- [53] DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Metrologisches Rasterkraftmikroskop. In: *50. IWK CD* (2005), S. 1–3
- [54] DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Novel investigations and developments in a metrological scanning probe microscope. In: *ICPM CD* (2008)
- [55] DUCOURTIEUX, S. ; POYET, B. : Development of a metrological atomic force microscope with minimized Abbe error and differential interferometer-based real-time position control. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), S. 094010–1–15. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094010>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/9/094010
- [56] DZIOMBA, T. ; DAI, G. ; RITTER, M. ; SHALEEV, M. : Turning Scanning Probe Microscopy into a more quantitative method. In: *COOMET Symposium* (2007), S. 1–4
- [57] DZIOMBA, T. ; KOENDERS, L. ; WILKENING, G. : Standardization in dimensional nanometrology: development of a calibration guideline for Scanning Probe Microscopy. In: *Proc. of the SPIE* 5965 (2005), S. 59650C–1–59650C–12
- [58] DZIOMBA, T. ; KOENDERS, L. ; WILKENING, G. ; FLEMMING, M. ; DUPARRE, A. : Entwicklung einer Kalibrierrichtlinie für Rastersondenmikroskope (Development of a Calibration Guideline for Scanning Probe Microscopes). In: *Technisches Messen* 72 (2005), S. 295–307

- [59] EDWARDS, H. ; TAYLOR, L. ; DUNCAN, W. ; MELMED, A. J.: Fast, high-resolution atomic force microscopy using a quartz tuning fork as actuator and sensor. In: *J. Appl. Phys.* 82 (1997), Nr. 3, S. 980–984
- [60] ERLANDSSON, R. ; MCCLELLAND, G. ; MATE, C. ; CHIANG, S. : Atomic force microscopy using optical interferometry. In: *J. Vac. Sci. Technol. A* 6 (1988), Nr. 2, S. 266–270
- [61] EVES, B. J.: Design of a large measurement-volume metrological atomic force microscope (AFM). In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), S. 1–5
- [62] FEYNMAN, R. P.: *There's Plenty of Room at the Bottom*. Engineering & Science. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>. Version: 29th December 1959. – published in the February 1960
- [63] FÜSSL, R. ; GRÜNWALD, R. ; SCHMIDT, I. : Messunsicherheitsanalyse von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit Hilfe eines neuen vektoriellen Modellansatzes (Analysis of the Measurement Uncertainties of Nanopositioning and Nanomeasuring Machines (NPM-Machines) by Means of a New Vectorial Model Approach). In: *Technisches Messen* 73 (2006), S. 465–471
- [64] FRIEDBACHER, G. ; FUCHS, H. : Classification of Scanning Probe Microscopies. In: *Pure Appl. Chem.* 71 (1999), Nr. 7, S. 1337–1357
- [65] FUJISAWA, S. ; OHTA, M. ; KONISHI, T. ; SUGAWARA, Y. ; MORITA, S. : Difference between the forces measured by an optical lever deflection and by an optical interferometer in an atomic force microscope. In: *Rev. Sci. Instrum.* 65 (1994), S. 644–647
- [66] GARCIA, R. ; PEREZ, R. : Dynamic atomic force microscopy methods. In: *Surface Science Reports* 47 (2002), S. 197–301
- [67] GIESSIBL, F. J.: Advances in atomic force microscopy. In: *Reviews of Modern Physics* 75 (2003), S. 949–983
- [68] GOJ, B. ; VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; WYSTUP, C. ; HOFFMANN, M. ; MANSKE, E. : Electromagnetic changer for AFM-tips. In: *Proceedings of the 23rd Micromechanics Europe Workshop, Ilmenau* (2012)
- [69] GOODAMN, F. O. ; GARCIA, N. : Roles of the attractive and repulsive forces in atomic-force microscopy. In: *Physical Review B* 43 (1991), Nr. 6, S. 4728–4731
- [70] GOODWIN, E. P. ; WYANT, J. C. ; GREIVENKAMP, J. E. (Hrsg.): *Field Guide to Interferometric Optical Testing (SPIE Field Guide Series Vol. FG10)*. SPIE Press, 2006. – 1–100 S.
- [71] GRÖGER, S. ; DIETZSCH, M. ; GERLACH, M. ; JESS, S. : “Real mechanical profile” – the new approach for nanomeasurements. In: *Journal of Physics: Conference Series 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments* 13 (2005), S. 13–19
- [72] GÖRLICH, M. : *Rasterkraftmikroskopie an weichen Materialien*, Universität Osnabrück, Diss., Oktober 2003

- [73] HAFERKORN, H. : *Optik: Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. 4., bearbeitete und erweiterte Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, 2003
- [74] HANSMA, P. ; DRAKE, B. ; GRIGG, D. ; PRATER, C. ; YASHAR, F. ; GURLEY, G. ; ELINGS, V. ; FEINSTEIN, S. ; LAL, R. : A new, optical-lever based atomic force microscope. In: *J. Appl. Phys.* 76 (1994), Nr. 2, S. 796–799
- [75] HASCHE, K. ; HERRMANN, K. ; MIRANDE, W. ; SEEMANN, R. ; VITUSHKIN, L. ; XU, M. ; YU, G. : Calibrated scanning force microscope with capabilities in the subnanometre range. In: *Surf. Interface Anal.* 33 (2002), S. 71–74
- [76] HASCHE, K. ; HERRMANN, K. ; MIRAND´E, W. ; SEEMANN, R. ; AHBE, T. ; BÜCHNER, H. : Über einige kalibrierte Rasterkraftmikroskope in der PTB (About Several Calibrated Scanning Force Microscopes in the PTB). In: *Technisches Messen* 67 (2000), S. 306–312
- [77] HAUSOTTE, T. ; PERCLE, B. ; GERHARDT, U. ; DONTSOV, D. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Interference signal demodulation for nanopositioning and nanomeasuring machines. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), S. 074004–1–8. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/23/7/074004>. – DOI 10.1088/0957-0233/23/7/074004
- [78] HAUSOTTE, T. ; PERCLE, B. ; JÄGER, G. : Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), S. 1–8
- [79] HAUSOTTE, T. ; VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; SHEN, J. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Dimensional metrology in the macroscopic range with sub-nanometre resolution. In: *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 227 (2013), Nr. 5, S. 657–661. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405413476386>. – DOI 10.1177/0954405413476386
- [80] HAUSOTTE, T. : *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2002
- [81] HAUSOTTE, T. : *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen - Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*, TU Ilmenau, Habilitation, 2011
- [82] HAYCOCKS, J. ; JACKSON, K. : Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy. In: *Precision Engineering* 29 (2005), S. 168–175
- [83] HAYCOCKS, J. ; JACKSON, K. : Detecting and addressing the surface following errors in the calibration of step heights by atomic force microscopy. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 469–475
- [84] HÜBNER, U. ; MORGENROTH, W. ; MEYER, H. ; SULZBACH, T. ; BRENDDEL, B. ; MIRANDÉ, W. : Downwards to metrology in nanoscale: determination of the AFM tip shape with well-known sharp-edged calibration structures. In: *Appl. Phys. A: Materials Science & Processing* 76 (2003), S. 913–917
- [85] HÜBNER, U. ; MORGENROTH, W. ; MEYER, H. ; SULZBACH, T. ; BRENDDEL, B. ; MIRANDÉ, W. : Determination of the AFM tip-shape with well-known sharpedged

- calibration structures: actual state and measuring results. In: *Appl. Phys. A: Materials Science & Processing* 76 (2004), S. 913–917
- [86] HEBEISEN, C. : *A Versatile, Multimode Scanning Probe Microscope*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, April 2002
- [87] HERRMANN, J. ; BABIC, B. ; FREUND, C. ; GRAY, M. ; HSU, M. ; McRAE, T. : Development of a metrological scanning probe microscope incorporating a quartz tuning fork sensor and heterodyne laser interferometry. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International* (2012), S. 908 – 911. <http://dx.doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229548>. – DOI 10.1109/I2MTC.2012.6229548
- [88] HIBBELER, R. C.: *Technische Mechanik 2 Festigkeitslehre*. 5. Addison-Wesley Verlag, 2006
- [89] HIDA, H. ; SHIKIDA, M. ; FUKUZAWA, K. ; ONO, A. ; SATO, K. ; ASAUMI, K. ; IRIYE, Y. ; MURAMATSU, T. ; HORIKAWA, Y. ; SATO, K. : Development of Self-Vibration and -Detection AFM Probe by Using Quartz Tuning Fork. In: *Transducers & Eurosensors* (2007), S. 1533–1536
- [90] HILBRUNNER, F. : *Ein Beitrag zur Feuchtekompensation von Präzisionsmeßgeräten*, Technische Universität Ilmenau, Diss., Juni 2005
- [91] HIPPEL, M. ; BIELEFELDT, H. ; COLCHERO, J. ; MARTI, O. ; MLYNEK, J. : A stand-alone scanning force and friction microscope. In: *Ultramicroscopy* 42-44 (1992), S. 1498–1503
- [92] HOFER, W. A. ; FOSTER, A. S. ; SHLUGER, A. L.: Theories of scanning probe microscopes at the atomic scale. In: *Reviews Of Modern Physics* 75 (2003), S. 1287–1331
- [93] HOFMANN, N. : *Integration eines Rasterkraftmikroskops in die Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, März 2003
- [94] HOFMANN, R. : *Aufbau eines Rasterkraftmikroskops für makroskopische Bereiche und dessen Anwendung bei der Untersuchung zur Beweglichkeit dünner adsorbierter Polymerschichten*, Universität Regensburg, Diss., Januar 2005
- [95] HOOGENBOOM, B. ; FREDERIX, P. ; YANG, J. ; MARTIN, S. ; PELLMONT, Y. ; STEINACHER, M. ; ZÄCH, S. ; LANGENBACH, E. ; HEIMBECK, H.-J. ; ENGEL, A. ; HUG, H. : A Fabry–Perot interferometer for micrometer-sized cantilevers. In: *Appl. Phys. Lett.* 86 (2005), S. 074101–1–074101–3
- [96] HOUMMADY, M. ; FARNAULT, E. ; YAHIRO, T. ; KAWAKATSU, H. : Simultaneous optical detection techniques, interferometry, and optical beam deflection for dynamic mode control of scanning force microscopy. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 15 (1997), Nr. 4, S. 1539–1542
- [97] HOWLAND, R. ; BENATAR, L. ; LECKENBY, J. (Hrsg.): *A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy*. ThermoMicroscopes, 2000
- [98] HUANG, Q.-X. ; FEI, Y.-T. ; GONDA, S. ; MISUMI, I. ; SATO, O. ; KEEM, T. ; KUROSAWA, T. : The interference effect in an optical beam deflection detection

- system of a dynamic mode AFM. In: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), S. 1417–1423
- [99] HUMPHRIS, A. D. ; ZHAO, B. ; CATTO, D. ; HOWARD-KNIGHT, J. P. ; KOHLI, P. ; HOBBS, J. K.: High speed nano-metrology. In: *Review of Scientific Instruments* 82 (2011), S. 043710–1–5. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3584935>. – DOI 10.1063/1.3584935
- [100] HWU, E.-T. ; ILLERS, H. ; JUSKO, L. ; DANZEBRINK, H.-U. : A hybrid scanning probe microscope (SPM) module based on a DVD optical head. In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), S. 1–8
- [101] HWU, E.-T. ; HUANG, K.-Y. ; HUNG, S.-K. ; HWANG, I.-S. : Measurement of Cantilever Displacement Using a Compact Disk / Digital Versatile Disk Pickup Head. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 45 (2006), Nr. 3B, S. 2368–2371
- [102] *ITRS 2.0: International technology roadmap for semiconductors 2.0, 2015 Edition, Executive Report.* 2015
- [103] *ITRS: International technology roadmap for semiconductors, 2008 Update, Overview.* 2008
- [104] *ITRS: International technology roadmap for semiconductors, Metrology.* 2006. – Update
- [105] JAYANTH, G. ; JHIANG, S. M. ; MENQ, C.-H. : Two-axis probing system for atomic force microscopy. In: *Review of Scientific Instruments* 79 (2008), S. 023705–1–023705–5
- [106] JÄGER, G. ; MANSKE, E. ; HAUSOTTE, T. ; FÜSSL, R. ; GRÜNWALD, R. ; BÜCHNER, H. : Nanomess- und -positioniertechnik. In: 47. IWK CD (2002), S. 1–8
- [107] JÄGER, G. : Lasernanomeßtechnik – Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungen in der modernen Gerätetechnik. In: 44. IWK CD (1999), S. 1–12
- [108] JÄGER, G. ; MANSKE, E. ; HANS-JOACHIM BÜCHNER, T. H.: Nanomessmaschine zur abbefehlerfreien Koordinatenmessung (Nano Measuring Machine for Zero Abbe Offset Coordinate Measuring). In: *Technisches Messen* 67 (2000), S. 319–323
- [109] KÖCHER, T. : *Nanolithographie mit einem Rasterkraftmikroskop*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2013
- [110] KELLER, D. : Reconstruction of STM and AFM images distorted by finite-size tips. In: *Surface Science* 253 (1991), S. 353–364
- [111] KHOMA, Y. : *Untersuchungen von metrologischen Eigenschaften eines Rasterkraftmikroskops*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Juli 2011
- [112] KIM, J.-A. ; KIM, J. W. ; KANG, C.-S. ; EOM, T. B.: Metrological Atomic Force Microscope Using a Large Range Scanning Dual Stage. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10 (2009), December, Nr. 5, S. 11–17. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-009-0087-z>. – DOI 10.1007/s12541-009-0087-z
- [113] KIM, J.-A. ; KIM, J. W. ; PARK, B. C. ; EOM, T. B.: Measurement of microscope calibration standards in nanometrology using a metrological atomic force microscope. In: *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006), S. 1792–1800

- [114] KIM, M.-S. ; MANZARDO, O. ; DANDLIKER, R. ; HERZIG, H. P. ; AESCHIMANN, L. ; STAUFER, U. ; VETTIGER, P. ; LEE, J.-H. : Atomic Force Microscopy with Optical Heterodyne Detection Method. In: *Optical MEMS and Their Applications Conference* 1 (2005), S. 173 – 174
- [115] KLAPETEK, P. ; VALTR, M. ; MATULA, M. : A long-range scanning probe microscope for automotive reflector optical quality inspection. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), S. 094011–1–7. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094011>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/9/094011
- [116] KOENDERS, L. : Nano 2 Step Height Standards / PTB. 2003. – Forschungsbericht
- [117] KOGELNIK, H. ; LI, T. : Laser Beams and Resonators. In: *Appl. Optics* 5 (1966), S. 1550–1567
- [118] KOPPE, A. : *Untersuchungen der Abnutzung von AFM-Spitzen*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2015
- [119] KORPELAINEN, V. ; LASSILA, A. : Calibration of a commercial AFM: traceability for a coordinate system. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 395–403
- [120] KORPELAINEN, V. ; SEPPÄ, S. ; LASSILA, A. : Design of MIKES Interferometrically Traceable Metrology Atomic Force Microscope.
- [121] KRAMAR, J. A. ; DIXSON, R. ; ORJI, N. G.: Scanning probe microscope dimensional metrology at NIST. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), S. 024001–1–11. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/2/024001>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/2/024001
- [122] KREUTZER, P. ; DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. ; FÜSSL, R. ; JÄGER, G. ; GRÜNWALD, R. : Monte Carlo simulation to determine the measurement uncertainty of a metrological scanning probe microscope measurement. In: *Proc. of the SPIE* 7378 (2009), S. 737816–1–12
- [123] KWON, J. ; HONG, J. ; KIM, Y.-S. ; LEE, D.-Y. ; LEE, K. L. S. ; PARK, S. il: Atomic force microscope with improved scan accuracy, scan speed, and optical vision. In: *Rev. Sci. Instrum.* 74 (2003), October, Nr. 10, S. 4378–4383
- [124] LASSILA, A. ; KORPELAINEN, V. : Design of an interferometrically traceable AFM at MIKES. In: *Proceedings of NanoScale* (2004). – Poster
- [125] LAZAR, J. ; KLAPETEK, P. ; CIP, O. ; CIZEK, M. ; SERY, M. : Local probe microscopy with interferometric monitoring of the stage nanopositioning. In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), S. 1–6
- [126] LEE, S.-H. ; KIM, H.-C. ; JUNG, K.-S. : Atomic force microscopy using optical pickup head to measure cantilever displacement. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12 (2011), Nr. 5, S. 913–915. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-011-0122-8>. – DOI 10.1007/s12541-011-0122-8
- [127] LEGLEITER, J. : The effect of drive frequency and set point amplitude on tapping forces in atomic force microscopy: simulation and experiment. In: *Nanotechnology* 20 (2009), S. 1–10

- [128] LI, J. ; SHEN, Y.-L. ; JEONG, J. ; SCIRE, F. E. ; KRAMAR, J. A.: A Compact, Compound Actuator for the Molecular Measuring Machine. In: *American Society for Precision Engineering, Annual Meeting, 23rd, Proceedings of ASPE 23rd Annual Meeting, American Society for Precision Engineering* (2008)
- [129] LU, M. ; GAO, S. ; JIN, Q. ; CUI, J. ; DU, H. ; GAO, H. : An atomic force microscope head designed for nanometrology. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 1735–1739
- [130] LUSTERMANN, B. : *Modellierung tubulärer optischer Fasern am Beispiel eines optisch-elektrischen Kombinationsleiters*, TU Ilmenau, Diss., 2015
- [131] LUTHER, W. ; MALANOWSKI, N. ; BACHMANN, G. ; HOFFKNECHT, A. ; HOLT-MANNSPÖTTER, D. ; ZWECK, A. ; HEIMER, T. ; SANDERS, H. ; WERNER, M. ; MIETKE, S. ; KÖHLER, T. : Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt, Innovations- und Technikanalyse / Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH. 2005. – Forschungsbericht
- [132] MACHLEIDT, T. ; KAPUSU, D. ; SPARER, E. ; MANSKE, E. ; FRANKE, K.-H. : Navigation in Large Measurement Volume by Using AFM Technology as Sensorsystem in the Nanopositioning and Nanomeasuring Machine (NPMM). In: *ICPM CD* (2008)
- [133] MACHLEIDT, T. ; FRANKE, K.-H. : Methoden zur Rekonstruktion der AFM-Spitzenform Bestimmung der AFM-Spitzenform aus den Messdaten. In: *VDI-Berichte* 1950 (2006), S. 187–196
- [134] MACHLEIDT, T. ; KÄSTNER, R. ; FRANKE, K.-H. : Reconstruction and geometric assessment of AFM tips. In: *Proc. Nanoscale* 1 (2005), S. 297–310
- [135] MACHLEIDT, T. ; SPARRER, E. ; DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. ; FRANKE, K.-H. ; KAPUSI, D. : Navigation in a Large Measurement Volume by Using AFM Technology as a Sensor System in the NPMM Navigation in einem großen Messvolumen in der Nanopositionier- und Mess-Maschine (NPMM) mittels AFM-Technologie. In: *Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 5, S. 274–277
- [136] MAGONOV, S. N.: Surface Characterization of Materials at Ambient Conditions by Scanning Tunneling Microscopy (STM) and Atomic Force Microscopy (AFM). In: *Applied Spectroscopy Reviews* 28 (1993), S. 1–121
- [137] MANSKE, E. ; FÜSSL, R. ; MASTYLO, R. ; VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; BIRLI, O. ; JÄGER, G. : Ongoing trends in precision metrology, particularly in nanopositioning and nanomeasuring technology. In: *tm – Technisches Messen* 82 (2015), Nr. 7-8, S. 359–366. <http://dx.doi.org/10.1515/teme-2015-0011>. – DOI 10.1515/teme-2015-0011
- [138] MANSKE, E. ; HAUSOTTE, T. ; MASTYLO, R. ; MACHLEIDT, T. ; FRANKE, K.-H. ; JÄGER, G. : New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 520–527
- [139] MANSKE, E. : *Lichtwellenleitergekoppelte Miniaturinterferometer für die Präzisionsmesstechnik*, Technische Universität Ilmenau, Habilitation, Juli 2006

- [140] MANSKE, E. ; JÄGER, G. ; HAUSOTTE, T. ; FÜSSL, R. : Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), Nr. 7, S. 074001–1–10. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/23/7/074001>. – DOI 10.1088/0957-0233/23/7/074001
- [141] MARGHITU, D. B. ; DUPAC, M. : *Advanced Dynamics: Analytical and Numerical Calculations with MATLAB, Chapter 2 Centroids and Moments of Inertia*. Springer, 2012. – 73–141 S.
- [142] MARINELLO, F. ; BALCON, M. ; SCHIAVUTA, P. ; CARMIGNATO, S. ; SAVIO, E. : Thermal drift study on different commercial scanning probe microscopes during the initial warming-up phase. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), Nr. 9, S. 094016–1–8. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094016>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/9/094016
- [143] MARINELLO, F. ; BARIANI, P. ; CHIFFRE, L. D. ; SAVIO, E. : Fast technique for AFM vertical drift compensation. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 689–696
- [144] MARTIN, Y. ; WILLIAMS, C. ; WICKRAMASINGHE, H. : Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale. In: *J. Appl. Phys.* 61 (1987), S. 4723–4729
- [145] MARTIN, Y. ; WICKRAMASINGHE, H. K.: Method for imaging sidewalls by atomic force microscopy. In: *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994), S. 2498–2500
- [146] MASTYLO, R. : *Optische und taktile Nanosensoren auf der Grundlage des Fokusverfahrens für die Anwendung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., Januar 2012
- [147] MELI, F. : New Traceable Atomic Force Microscope for Dimensional Measurements. In: *METinfo* 18 (2011), Nr. 2, S. 4–10
- [148] MELI, F. ; THALMANN, R. : Das Metrologie-Rasterkraftmikroskop. In: *OFMET Info* 6 (1999), Nr. 1, S. 1–7
- [149] MENELAO, F. : *Kalibrierschein Schichtdickennormal.* : PTB, Januar 2002
- [150] MERRY, R. ; UYANIK, M. ; MOLENGRAFT, R. van d. ; KOOPS, R. ; VEGHEL, M. van ; STEINBUCH, M. : Identification, Control and Hysteresis Compensation of a 3 DOF metrological AFM. In: *Asian Journal of Control* 11 (2009), March, Nr. 2, S. 130–143
- [151] MESSERSCHMIDT, C. H.: *Meso- und Nanostrukturierung von Oberflächen mit supra-molekularen Aggregaten und deren Charakterisierung mit dem Rasterkraftmikroskop*, Freie Universität Berlin, Diss., 1999
- [152] MEYER, E. : Atomic Force Microscopy. In: *Progress in Surface Science* 41 (1992), S. 3–49
- [153] MEYER, E. ; HUG, H. ; BENNEWITZ: *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*. Springer Verlag, 2004
- [154] MEYER, G. ; AMER, N. M.: Novel optical approach to atomic force microscopy. In: *Appl. Phys. Lett.* 53 (1988), September, Nr. 12, S. 1045–1047

- [155] MEYER, G. ; AMER, N. M.: Simultaneous measurement of lateral and normal forces with an optical-beam-deflection atomic force microscope. In: *Appl. Phys. Lett.* 57 (1990), S. 2089–2091
- [156] MISUMI, I. ; GONDA, S. ; HUANG, Q. ; KEEM, T. ; KUROSAWA, T. ; FUJII, A. ; HISATA, N. ; YAMAGISHI, T. ; FUJIMOTO, H. ; ENJOJI, K. ; AYA, S. ; SUMITANI, H. : Sub-hundred nanometre pitch measurements using an AFM with differential laser interferometers for designing usable lateral scales. In: *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), S. 2080–2090
- [157] MISUMI, I. ; GONDA, S. ; KUROSAWA, T. ; TAKAMASU, K. : Uncertainty in pitch measurements of one-dimensional grating standards using a nanometrological atomic force microscope. In: *Meas. Sci. Technol.* 14 (2003), S. 463–471
- [158] MÜLLER, A. ; MASTYLO, R. ; VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. : Markers for Referencing Topography Measurement Data of Optical Surfaces. In: *Shaping the future by engineering: 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau* (2014), 8-12 September
- [159] MOSER, A. ; HUG, H. ; JUNG, T. ; SCHWARZ, U. ; GÜNTHERODT, H.-J. : A miniature fibre optic force microscope scan head. In: *Meas. Sci. Technol.* 4 (1993), S. 769–775
- [160] Nanosurf AG. <http://www.nanosurf.com/>. – Stand: Oktober 2016
- [161] NEBER, S. : *Piezoresistive Sensoren auf der Basis von III-V Halbleitern*, Universität Kassel, Diss., 2000
- [162] Norm DIN EN ISO 11562 September 1998. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern*
- [163] Norm DIN EN ISO 3274 April 1998. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*
- [164] Norm DIN EN ISO 4288 April 1998. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*
- [165] Norm DIN EN ISO 5436-1 November 2000. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale - Teil 1: Maßverkörperungen*
- [166] Norm DIN V ENV 13005 Juni 1999. *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*
- [167] NOVIKOV, Y. ; OZERIN, Y. ; RAKOV, A. ; TODUA, P. : Method for linear measurements in the nanometre range. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 367–374
- [168] NT-MDT Co. <http://www.ntmdt.com/>. – Stand: Oktober 2016
- [169] NYSSONEN, D. ; LANDSTEIN, L. ; COOMBS, E. : Two-dimensional atomic force microprobe trench metrology system. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 9 (1991), S. 3612–3616
- [170] Park Systems Corp. <http://www.parkafm.com/>. – Stand: Oktober 2016

- [171] PETERSEN, K. E.: Silicon as a Mechanical Material. In: *Proceedings of the IEEE* 70 (1982), May, Nr. 5, S. 420–457
- [172] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG. (Hrsg.): *Tutorium: Piezoaktuatorik und Nanopositionierung*. : Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG., 2006
- [173] PICOTTO, G. ; PISANI, M. : A sample scanning system with nanometric accuracy for quantitative SPM measurement. In: *Ultramicroscopy* 86 (2000), S. 247–254
- [174] PIOT, J. ; QIAN, J. ; PIRÉE, H. ; KOTTE, G. ; HAESSENDONCK, C. V. ; REYNAERTS, D. : Design of a thermally and mechanically stable metrological atomic force microscope at KULeuven. In: *Proceedings of the EUSPEN International Conference – San Sebastian* (2009), June, S. 1–4
- [175] PUTMAN, C. A. ; GROOTH, B. G. D. ; HULST, N. F. V. ; GREVE, J. : A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy. In: *Journal of Applied Physics* 72 (1992), S. 6–12
- [176] PUTMAN, C. A. ; GROOTH, B. G. ; HULST, N. F. ; GREVE, J. : A theoretical comparison between interferometric and optical beam deflection technique for the measurement of cantilever displacement in AFM. In: *Ultramicroscopy* 42-44 (1992), S. 1509–1513
- [177] RAHNEBERG, I. : *Untersuchungen zu optischen Mehrkomponentenmesssystemen*, TU Ilmenau, Diss., 2013
- [178] RANGELOW, I. W. ; IVANOV, T. ; VOLLAND, B. E. ; DONTSOV, D. ; SAROV, Y. ; IVANOVA, K. ; PERSAUD, A. ; FILENKO, D. ; NIKOLOV, N. ; SCHMIDT, B. ; ZIER, M. ; GOTSZALK, T. ; SULZBACH, T. : Raster-Sonden-Mikroskopie mit Cantilever-Arrays (Scanning Probe Microscopy with Cantilever Arrays). In: *Technisches Messen* 73 (2006), S. 485–492
- [179] RANGELOW, I. W.: Piezoresistive Raster-Kraftsonden für die Nanowissenschaften (Piezoresistive Scanning Proximity Probes for Nanoscience). In: *Technisches Messen* 72 (2005), S. 103–110
- [180] Richtlinie VDI/VDE 2656 Blatt 1 Juni 2008. *Bestimmung geometrischer Messgrößen mit Rastersondenmikroskopen Kalibrierung von Messsystemen; Determination of geometrical quantities by using of Scanning Probe Microscopes Calibration of measurement systems*
- [181] RIJK, I. de: *Design of a Metrological Atomic Force Microscope Head*, Technische Universiteit Eindhoven, Diplomarbeit, December 2008
- [182] RITTER, N. ; RUTH, M. : *GeoTIFF*. <http://trac.osgeo.org/geotiff/wiki>. – Stand: Oktober 2016
- [183] RUF, A. ; ABRAHAM, M. ; DIEBEL, J. ; EHRFELD, W. ; GÜTHNER, P. ; LACHER, M. ; MAYR, K. ; REINHARDT, J. : Integrated Fabry–Pérot distance control for atomic force microscopy. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 15 (1997), Nr. 3, S. 579–585
- [184] RUGAR, D. ; MAMIN, H. ; GUETHNER, P. : Improved fiber-optic interferometer for atomic force microscopy. In: *Appl. Phys. Lett.* 55 (1989), Nr. 25, S. 2588–2590
- [185] SALEH, B. E. ; TEICH, M. C.: *Grundlagen der Photonik*. Wiley-VCH, 2008

- [186] SASAKI, M. ; HANE, K. ; OKUMA, S. ; HINO, M. ; BESSHO, Y. : Improved differential heterodyne interferometer for atomic force microscopy. In: *Rev. Sci. Instrum.* 65 (1994), Nr. 12, S. 3697–3701
- [187] SAVIO, E. ; MARINELLO, F. ; BARIANI, P. ; CARMIGNATO, S. : Feature-Oriented Measurement Strategy in Atomic Force Microscopy. In: *Annals of the CIRP* 56 (2007), Nr. 1, S. 557–560
- [188] SCHITTER, G. : Improving the Speed of AFM by Mechatronic Design and Modern Control Methods Geschwindigkeitsverbesserung beim AFM mittels mechatronischem Design und modernen Regelmethode. In: *Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 5, S. 266–273
- [189] SCHMIDT, I. : *Beiträge zur Verringerung der Messunsicherheit der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diss., September 2008
- [190] SCHNEIR, J. ; MCWAID, T. ; ALEXANDER, J. ; WILFLEY, B. : Design of an atomic force microscope with interferometric position control. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 12 (1994), 6, S. 3561–3566
- [191] SCHOTT AG (Hrsg.): *Optisches Glas Datenblätter*. : SCHOTT AG, 2015
- [192] Schutzrecht DE 10 2005 056 467 A1 (Juni 2007). SIOS Meßtechnik GmbH, Technische Universität Ilmenau. Pr.: DE 10 2005 056 467 A1 Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung zur Messung der Translation und der Kippung einer Oberfläche
- [193] Schutzrecht DE 102 97 054 T5 (Oktober 2004). The Regents of the University of California. Pr.: DE 102 97 054 T5 Bezeichnung: Messkopf für ein Rasterkraftmikroskop und weitere Anwendungen
- [194] Schutzrecht DE 39 42 896 A1 (Juni 1991). Fa. Carl Zeiss, DE. Pr.: DE 39 42 896 A1 Bezeichnung: Interferometrischer Sensor zur Messung von Abstandsänderungen einer kleinen Fläche
- [195] Schutzrecht DE 697 38 317 T2 (Oktober 2008). Regents of the University of California, Oakland, Calif., US. Pr.: DE 697 38 317 T2 Bezeichnung: Rasterkraftmikroskop zur Erzeugung eines kleinen Einfallstrahlflecks
- [196] Schutzrecht EP 1 430 486 B1 (Oktober 2007). Jpk Instr Ag, De. Pr.: EP 1 430 486 B1 Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung zum Messen einer Probe mit Hilfe eines Rastersondenmikroskops
- [197] Schutzrecht US 2004/0140426 A1 (Juli 2004). PSIA Corporation. Pr.: US 2004/0140426 A1 Bezeichnung: Scanning probe microscope with improved probe head mount
- [198] Schutzrecht US 5,440,920 (August 1995). Molecular Imaging Systems, Tempe, Arizona. Pr.: US 5,440,920 Bezeichnung: Scanning Probe Microscope with Beam Tracking Lens
- [199] Schutzrecht US 5,616,916 A (April 1997). Matsushita Electric Ind Co Ltd, Jp. Pr.: US 5,616,916 Bezeichnung: Configuration measuring method and apparatus for optically detecting a displacement of a probe due to an atomic force

- [200] Schutzrecht US 5,825,020 A (Oktober 1998). The Regents of the University of California, Oakland CA. Pr.: US 5,825,020 Bezeichnung: Atomic force microscope for generating a small incident beam spot
- [201] Schutzrecht US 6,032,518 A (März 2000). Digital Instr Inc, Us. Pr.: US 6,032,518 Bezeichnung: Scanning stylus atomic force microscope with cantilever tracking and optical access
- [202] Schutzrecht US 6,945,099 B1 (September 2005). Veeco Instruments Inc. Pr.: US 6,945,099 B1 Bezeichnung: Torsional resonance mode probe-based instrument and method
- [203] SCIENCE SERVICES (Hrsg.): *m2c 3D Kalibriertechnologie für Rasterkraftmikroskopie*. : Science Services, 2014
- [204] SHEN, J. ; DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; JYWE, W. ; LIU, C. : Active Probe Control of a Metrological Atomic Force Microscopy. In: *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2 1* (2011), S. 3533–3538
- [205] SIOS MESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Anwenderdokumentation zum Schwingungsmessmodul SM-04*. : SIOS Meßtechnik GmbH, Mai 2004
- [206] SLOCUM, A. : Kinematic Couplings: A Review of Design Principles and Applications. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50.4 (2010), S. 310–327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.006>. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2009.10.006
- [207] SOMMER, K.-D. ; SIEBERT, B. R.: Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM (Practical Determination of the Measurement Uncertainty under GUM). In: *Technisches Messen* 71 (2004), S. 52–66
- [208] SOMMER, K.-D. ; SIEBERT, B. R.: Systematische Modellbildung und Grundsätze der Bereichskalibrierung (Systematic Modelling and Fundamentals of Range Calibration). In: *Technisches Messen* 72 (2005), S. 258–277
- [209] SPIESS, L. ; MACHLEIDT, T. ; CIMALLA, V. ; GUBISCH, M. ; AMBACHER, O. ; FRANKE, K.-H. : Development of a reference field for a NPM-machine. In: *50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau* (2005), 19.-23. September
- [210] STEGEMANN, B. : Nanotribologie: Grundlagen von Reibung und Verschleiß. In: *Galvanotechnik* 11 (2008), S. 2706–2713
- [211] Team Nanotec GmbH. <http://www.team-nanotec.de/>. – Stand: Oktober 2016
- [212] TEAM NANOTEC GMBH (Hrsg.): *Products - SPM probe tips*. : Team Nanotec GmbH, February 2009. <http://www.team-nanotec.de/index.cfm>
- [213] TORTONESE, M. ; BARRETT, R. ; QUATE, C. : Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection. In: *Appl. Phys. Lett.* 62 (1993), Nr. 8, S. 834–836
- [214] TSENG, A. A. ; JOU, S. ; NOTARGIACOMO, A. ; CHEN, T. : Recent Developments in Tip-Based Nanofabrication and Its Roadmap. In: *J. Nanosci. Nanotechnol.* 8 (2008),

- S. 1–20. <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2008.243>. – DOI 10.1166/jnn.2008.243
- [215] VILALTA-CLEMENTE, A. ; GLOYSTEIN, K. ; FRANGIS, N. : Principles of Atomic rinciples Force Microscopy (AFM). In: *Physics of Advanced Materials Winter School* (2008)
- [216] VILLARRUBIA, J. : Scanned probe microscope tip characterization without calibrated tip characterizers. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 14 (1996), Nr. 2, S. 1518–1521
- [217] VILLARRUBIA, J. : Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction, and Tip Estimation. In: *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 102 (1997), Nr. 4, S. 425–454
- [218] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; FÜSSL, R. ; MANSKE, E. : Application of the metrological SPM for long distance measurements. In: *Shaping the future by engineering: 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau* (2014), 8-12 September
- [219] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; GOJ, B. ; MACHLEIDT, T. ; FRANKE, K.-H. ; HOFMANN, M. ; MANSKE, E. : Multifunctional nanoanalytics and long-range scanning probe microscope using a nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 25 (2014), S. 044006–1–7. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/25/4/044006>. – DOI 10.1088/0957-0233/25/4/044006
- [220] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. : Improvement in metrological AFM for long distance measurements. In: *NanoScale* (2016), S. 111
- [221] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; MANSKE, E. ; SHEN, J.-C. ; JÄGER, G. : Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), September, S. 094012–1–7. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094012>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/9/094012
- [222] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. : Improvement in Long Term Stability of the Long Range AFMs. In: *XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”* (2015)
- [223] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. : Scanning strategies for long term and long distance AFM measurements. In: *Proceedings of the 16th euspen International Conference* (2016)
- [224] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Interferometer-based scanning probe microscope for high-speed, longrange, traceable measurements. In: *PAK 2* (2014), S. 69–72
- [225] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G. : Interferometrisches Rasterkraftmikroskop: Aufbau, messtechnische Eigenschaften und Applikationsmessungen. In: *Technisches Messen* 85 (2018), Nr. s1, S. s52–s58. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1515/teme-2018-0023>. – DOI <https://doi.org/10.1515/teme-2018-0023>
- [226] VORBRINGER-DOROZHOVETS, N. ; MASTYLO, R. ; MANSKE, E. : Investigation of position detectors for atomic force microscopes. In: *Meas. Sci. Technol.* 29

- (2018), S. 105101 (13pp). <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/aad397>. – DOI 10.1088/1361-6501/aad397
- [227] WANG, S. ; XU, G. ; TAN, S. : Development of a metrological atomic force microscope for nano-scale standards calibration. In: *Proc. of SPIE* 7155 (2008), S. 71550I (8 pp). <http://dx.doi.org/10.1117/12.814517>. – DOI 10.1117/12.814517
- [228] WANG, S. ; XIE, T. ; CHANG, S. : A white light interference-based atomic force probe scanning microscopy. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), Nr. 4, S. 045502–1–8. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/4/045502>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/4/045502
- [229] WANG, Y. ; HU, X. ; XU, L. ; HU, X. : Improving the scanning speed of atomic force microscopy at the scanning range of several tens of micrometers. In: *Ultramicroscopy* 124 (2013), January, S. 102–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2012.08.001>. – DOI 10.1016/j.ultramic.2012.08.001
- [230] WATANABE, H. ; UCHIHASHI, T. ; KOBASHI, T. ; SHIBATA, M. ; NISHIYAMA, J. ; YASUDA, R. ; ANDO, T. : Wide-area scanner for high-speed atomic force microscopy. In: *Rev. Sci. Instrum.* 84 (2013), S. 053702–1–10. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4803449>. – DOI 10.1063/1.4803449
- [231] WECKENMANN, A. ; ERNST, R. : Anforderungen an die zukünftige Mikro- und Nanomesstechnik — Herausforderungen und Vorgehensweisen (Future Requirements on Micro- and Nanomeasurement Technique — Challenges and Approaches). In: *Technisches Messen* 67 (2000), S. 334–342
- [232] WELTER, M. : *Beitrag zur Entwicklung nanoskaliger Kalibriersysteme*, Technische Universität Ilmenau, Diss., November 2006
- [233] WELTER, M. ; MANSKE, E. ; PÖSCHEL, W. ; DONTSOV, D. : Ultrapräzise Laserkalibriersysteme für die Nanotechnologien, insbesondere für Rastersondenmikroskope: gemeinsamer Schlussbericht zum Verbundprojekt / Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Institut Prozessmess- und Sensortechnik; SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau. 2003. – Forschungsbericht
- [234] WERF, K. O. d. ; PUTMAN, C. A. ; GROOTH, B. G. ; SEGERINK, F. B. ; SCHIPPER, E. H. ; HULST, N. F. ; GREVE, J. : Compact stand-alone atomic force microscope. In: *Rev. Sci. Instrum.* 64 (1993), Nr. 10, S. 2892–2897. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1144378>. – DOI 10.1063/1.1144378
- [235] WERNER, C. : *A 3D translation stage for metrological AFM*, Technische Universiteit Eindhoven, Diss., 2010
- [236] WILKENING, G. : Nanopositionierungen — die Basis der Nanometrologie (Nano Positioning Devices — The Basis of Nano-Metrology). In: *Technisches Messen* 67 (2000), S. 298–305
- [237] YACOOT, A. ; KOENDERS, L. : Aspects of scanning force microscope probes and their effects on dimensional measurement. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (2008), S. 1–46

-
- [238] YACOOT, A. ; KOENDERS, L. : Recent developments in dimensional nanometrology using AFMs. In: *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011), October, S. 122001 (12pp). <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/12/122001>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/12/122001
- [239] YACOOT, A. ; KOENDERS, L. ; WOLFF, H. : An atomic force microscope for the study of the effects of tip-sample interactions on dimensional metrology. In: *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007), S. 350–359
- [240] ZURICH INSTRUMENTS (Hrsg.): *HF2PLL Phase-locked Loop. Connecting an HF2PLL to a Bruker Icon AFM / Nanoscope V Controller.* : Zurich Instruments, Februar 2012. – Technical Note

Anhang

A Anhang: Übersicht kommerzieller Rastersondenmikroskope

Eine Marktübersicht der kommerziell erhältlichen AFM über die letzten 10 Jahren ist auf den nachfolgenden Seiten tabellarisch aufgelistet. Es werden unterschiedliche AFM-Hersteller, deren wesentliche Geräte und Geräteserien, sowie einige messtechnische Eigenschaften und Besonderheiten, zusammengefasst. Die Mehrheit der hier aufgelisteten AFM sind noch jetzt kommerziell verfügbar. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, da ständig neue AFM-Geräte auf den Markt kommen. Die zur Zeit wichtigsten AFM-Hersteller sind:

- Bruker Corporation,
- Nanosurf AG,
- NT-MDT Co. und
- Park Systems Co.

Anbieter/ Hersteller	Gerätename	Rastereinheit			Lage- detektor	Metrologische Eigenschaften	Anordnung	Besonderheiten
		Messbereich <i>x-y</i> -Achse	Messbereich <i>z</i> -Achse	Sensor ³²				
Agilent Technolo- gies Inc. ³³	5100, 5400, 5420, 5500, 5600 SPM/AFM ³⁴	<i>closed-loop</i> bis 90 µm × 90 µm	<i>closed-loop</i> bis 8 µm	induk- tiv	Lichtzeiger	<i>z</i> -Rauschen: 0,05 nm	<i>Scanning Probe</i>	zahlreiche Rastersondenme- thoden möglich
AIST-NT Inc.	SmartSPM™ 1000	<i>closed-loop</i> 100 µm × 100 µm	<i>closed-loop</i> 15 µm	kapazi- tiv	Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: 0,03 %, <i>x-y</i> -Rauschen: 0,1 nm, <i>z</i> -Nichtlinearität: 0,1 %, <i>z</i> -Rauschen: < 0,04 nm	<i>Scanning Sample</i>	hohe Scange- schwindigkeit
Ambios Technolo- gy Inc. ³⁵	Q-Scope- Serie ³⁶	<i>closed-loop</i> 80 µm × 80 µm	<i>closed-loop</i> 8 µm		Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: 0,1 %, <i>z</i> -Nichtlinearität: 1 %	<i>Scanning Probe</i> oder <i>Sample</i>	patentier- te optische Anordnung zum Nachführen des Lichtstrahls
Angstrom Advanced Inc.	AA-Serie SPM	10 µm × 10 µm	8 µm		Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Auflösung: 0,26 nm, <i>z</i> -Auflösung: 0,1 nm	<i>Scanning Sample</i>	STM
Asylum Research, Oxford In- struments Company	Cypher™ AFM	<i>closed-loop</i> 30 µm × 30 µm	<i>closed-loop</i> 5 µm	LVDT	Lichtzeiger	Rauschen: < 60 pm, <i>x-y</i> -Drift: < 20/150 nm/°C (mit/ ohne Temperierung, Temperaturkontrolle)	<i>Scanning Sample</i>	für kleine <i>Cantilever</i> geeignet, 3 µm Lichtspot

³²Sensor zur Positionsbestimmung ist meist optional und ist nicht in der Standardausführung des Gerätes verfügbar.

³³Der AFM-Bereich gehört seit August 2014 zu Keysight Technologies.

³⁴Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.

³⁵Bis 2006 Quesant Instrument Corporation, seit 2010 KLA-Tencor Corporation.

³⁶Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.

Asylum Research, Oxford Instruments Company	MFP-3D™ Serie	<i>closed-loop</i> 90 µm × 90 µm	<i>closed-loop</i> 15 µm bis 40 µm	LVD	Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: < 0,5 %, <i>x-y</i> -Rauschen: < 0,5 nm, <i>z</i> -Nichtlinearität: < 0,05 %, <i>z</i> -Rauschen: < 0,25 nm	Messobjekt: <i>x-y</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	zahlreiche Betriebsarten und Rastersondenmethoden möglich
attocube systems AG	attoAFM-Serie	bis 40 µm × 40 µm			Faserinterferometer, “ <i>tuning fork</i> ”	<i>z</i> -Auflösung: 7,6 pm, <i>z</i> -Rauschen: 0,12 nm	<i>Scanning Sample</i>	Messungen bei niedrigen Temperaturen möglich
Breitmeier Messtechnik GmbH ³⁷	<i>MultiScan</i> AFM Serie ³⁸	bis 800 µm × 800 µm				<i>z</i> -Auflösung: < 1 nm		Betrieb in Flüssigkeiten möglich
Bruker AXS GmbH ³⁹	NANOS N8-Serie ⁴⁰	<i>closed-loop</i> 20 µm × 20 µm bis 400 µm × 400 µm	3 µm bis 16 µm	DMS (<i>x-y</i> -Achse)	Faserinterferometer	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: 1 %, <i>z</i> -Rauschen: < 0,05 nm	<i>Scanning Probe</i>	kompakt, in optischen Mikroskopen einsetzbar
DME Nanotechnologie GmbH ⁴¹	DS 95-50/200	50 µm × 50 µm, 200 µm × 200 µm	<i>closed-loop</i> 2,7 µm, 15 µm	optisch (<i>z</i> -Achse)	Lichtzeiger	Auflösung: < 0,3 nm, Nichtlinearität: < 1 %, <i>x-y</i> -Rauschen: < 5 nm, <i>z</i> -Rauschen: < 30 pm	<i>Scanning Probe</i>	STM und zahlreiche Rastersondenmethoden möglich
Hitachi High-Tech Corporation	AFM5500M	<i>closed-loop</i> 200 µm × 200 µm	<i>closed-loop</i> 15 µm		Lichtzeiger			zahlreiche Rastersondenmethoden möglich

³⁷Seit Ende 2015 NanoFocus AG.³⁸Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.³⁹Bis Oktober 2008 S.I.S. Surface Imaging Systems GmbH.⁴⁰Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.⁴¹Seit Juli 2015 Semilab Germany GmbH.

Infinitesima Ltd.	VideoAFM™	bis 3 µm × 3 µm	bis 100 nm		Lichtzeiger	z-Auflösung: < 1 nm	“schnelle” Scanachse Probe, “langsames” – Sample	Abtastrate im Videobereich bis zu 25 Bilder pro Sekunde
JEOL GmbH	JSPM-Serie ⁴²	10 µm × 10 µm	3 µm		Lichtzeiger		Scanning Probe	Betrieb im Vakuum möglich
JPK Instruments AG ⁴³	NanoWizard® II	closed-loop 100 µm × 100 µm	closed-loop 15 µm	kapazitiv	Lichtzeiger	Auflösung: < 55 pm, x-y-Rauschen: 0,3 nm, z-Rauschen: < 0,15 nm	Scanning Probe	Betrieb in Flüssigkeiten möglich
“Nano Scan Technology” Ltd.	Certus-Serie	closed-loop 100 µm × 100 µm	closed-loop 15 µm	kapazitiv	Lichtzeiger	Nichtlinearität: < 0,03 %, x-y-Auflösung: < 1 nm, z-Auflösung: < 0,1 nm, Drift: < 1 nm/h	Scanning Probe	STM
Nanonics Imaging Ltd.	Akademia™	10 µm × 10 µm bis 70 µm × 70 µm	5 µm		Lichtzeiger	Schrittweite: 0,1 nm	Scanning Sample	AFM für Lehr- und Lernzwecke
Nanonics Imaging Ltd.	MultiView™ - Serie	closed-loop 10 µm × 10 µm bis 70 µm × 70 µm	closed-loop bis 70 µm		Lichtzeiger, “tuning fork”	Schrittweite: < 1 nm, z-Rauschen: < 0,05 nm	Scanning Sample oder Probe	NSOM, Betrieb in Flüssigkeiten, gleichzeitige Benutzung von mehreren Sonden möglich
Nanosurf AG	easyScan 2	10 µm × 10 µm bis 110 µm × 110 µm	2 µm bis 22 µm		Lichtzeiger	x-y-Auflösung: 1,7 nm, x-y-Nichtlinearität: 1,2 %, z-Auflösung: 0,34 nm, z-Rauschen: < 0,55 nm	Scanning Probe	in kompakter kabelloser Ausführung erhältlich

⁴²Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.⁴³Seit Juli 2018 Bruker Corporation.

Nanosurf AG	Nanite	10 µm × 10 µm bis 110 µm × 110 µm	2 µm bis 22 µm		Lichtzeiger, "tuning fork"	<i>x-y</i> -Auflösung: 1,7 nm, <i>x-y</i> -Nichtlinearität: 0,6 %, <i>z</i> -Auflösung: 0,34 nm, <i>z</i> -Rauschen: <0,55 nm	<i>Scanning Probe</i>	unterschiedliche Deflektionsmess- verfahren
Nanotec Electronics S.L. ⁴⁴	Nanotec SPM Head	10 µm × 10 µm bis 70 µm × 70 µm	2 µm bis 12 µm		Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Rauschen: 67 pm, <i>z</i> -Rauschen: 13 pm	<i>Scanning Probe</i>	patentierter Scanner
Novascan Technologies Inc.	ESPM 3D AFM-Serie ⁴⁵	<i>closed-loop</i> 20 µm × 20 µm bis 200 µm × 200 µm	<i>closed-loop</i> 2 µm bis 12 µm		Lichtzeiger		<i>Scanning Probe</i>	EFM, MFM, STM
NT-MDT Co.	NTEGRA-Serie	<i>closed-loop</i> 3 µm × 3 µm bis 100 µm × 100 µm	<i>closed-loop</i> 2,6 µm bis 10 µm	kapazi- tiv	Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: <0,15 %, <i>x-y</i> -Rauschen: <0,3 nm, <i>z</i> -Rauschen: 0,07 nm	<i>Scanning Probe</i> und <i>Sample</i>	gleichzeitiger Einsatz beider Scanner
NT-MDT Co.	SMENA-Serie	<i>closed-loop</i> 50 µm × 50 µm bis 100 µm × 100 µm	<i>closed-loop</i> 2,5 µm bis 5 µm	kapazi- tiv	Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: <0,15 %, <i>x-y</i> -Rauschen: <0,2 nm, <i>z</i> -Rauschen: 0,07 nm	<i>Scanning Probe</i>	Betrieb im Vakuum möglich
NT-MDT Co.	SOLVER NEXT TM	<i>closed-loop</i> 3 µm × 3 µm, 100 µm × 100 µm	<i>closed-loop</i> 2 µm, 10 µm	kapazi- tiv	Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: <0,1 %, <i>z</i> -Rauschen: 0,04 nm	<i>Scanning Sample</i>	automatisiertes AFM
Omicron Nanotechnology GmbH	UHV AFM/STM	6 µm × 6 µm	1 µm		Lichtzeiger	<i>z</i> -Auflösung: 0,01 nm	<i>Scanning Sample</i>	Betrieb im Vakuum möglich

⁴⁴Dieser Hersteller existiert nicht mehr.

⁴⁵Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.

Pacific Nanotechnology Inc. ⁴⁶	Nano-Serie	<i>closed-loop</i> 90 µm × 90 µm	<i>closed-loop</i> 8 µm	induktiv	Lichtzeiger, "tuning fork"	Nichtlinearität: < 1 %, z-Rauschen: 0,06 nm	<i>Scanning Probe</i> , optional <i>Sample</i>	gleichzeitiger Einsatz beider Scanner
Park Systems Corp.	NX10	<i>closed-loop</i> 50 µm × 50 µm bis 100 µm × 100 µm	<i>closed-loop</i> 15 µm bis 40 µm		Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Rauschen: < 0,3 nm, <i>z</i> -Rauschen: < 0,03 nm	Messobjekt: <i>x-y</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	minimale thermische Ausdehnung des Aufbaus; zahlreiche Betriebsarten und Rastersondenmethoden möglich
Park Systems Corp.	XE-Serie	<i>closed-loop</i> 5 µm × 5 µm bis 100 µm × 100 µm	<i>closed-loop</i> 12 µm bis 25 µm	optisch (<i>x-y</i> -Achse)	Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Nichtlinearität: < 0,5 %, <i>z</i> -Rauschen: < 0,05 nm	Messobjekt: <i>x-y</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	Möglichkeit Spitzen von Hand zu wechseln, ohne den Messkopf auszubauen
RHK Technology Inc.	ATM 350 AFM/STM, UHV 350/750 AFM	5 µm × 5 µm bis 8 µm × 8 µm	0,3 µm bis 0,5 µm		Lichtzeiger	<i>x-y</i> -Auflösung: 0,05 nm, <i>z</i> -Auflösung: 0,01 nm, Drift: < 0,1 nm/min	<i>Scanning Probe</i>	Betrieb im Vakuum möglich
Thorlabs Inc.	Educational AFM	20 µm × 20 µm			Lichtzeiger		<i>Scanning Sample</i>	AFM für Lehr- und Lernzwecke
Veeco Instruments Inc. ⁴⁷	Dimension-Serie	<i>closed-loop</i> 90 µm × 90 µm	<i>closed-loop</i> bis 10 µm		Lichtzeiger	Nichtlinearität: < 0,5 %, <i>x-y</i> -Rauschen: < 0,15 nm, <i>z</i> -Rauschen: 0,05 nm, Drift: < 0,2 nm/min	<i>Scanning Sample</i>	zahlreiche Betriebsarten und Rastersondenmethoden möglich

⁴⁶Seit 2009 Agilent Technologies Inc.⁴⁷Der SPM-Bereich gehört seit ende 2010 zu Bruker AXS GmbH bzw. Bruker Corporation.

Veeco Instruments Inc. ⁴⁸	MultiMode-Serie	0,4 µm × 0,4 µm bis 125 µm × 125 µm	<i>closed-loop</i> bis 20 µm	kapazitiv	Lichtzeiger	<i>z</i> -Nichtlinearität: < 0,1 %, <i>z</i> -Rauschen: 0,5 nm	<i>Scanning Sample</i>	zahlreiche Betriebsarten und Rastersondenmethoden möglich
Windsor Scientific Ltd.	iProbe ⁴⁹ AFM/SECM	40 µm × 40 µm bis 200 µm × 200 µm	5 µm bis 20 µm		Lichtzeiger		<i>Scanning Probe</i>	STM, SECM
WITec GmbH	alpha300 A	<i>closed-loop</i> 100 µm × 100 µm bis 200 µm × 200 µm	<i>closed-loop</i> 20 µm	kapazitiv	Lichtzeiger		<i>Sample Scanning</i>	Modulares Geräte-Konzept, kombinierbar mit anderen Mikroskopen

⁴⁸Der SPM-Bereich gehört seit ende 2010 zu Bruker AXS GmbH bzw. Bruker Corporation.

⁴⁹Die Geräte werden nicht mehr hergestellt.

B Anhang: Übersicht metrologischer Rastersondenmikroskope

Eine Übersicht der MAFM nationaler Metrologie-Institute (NMI) ist auf den nachfolgenden Seiten tabellarisch aufgelistet. Es werden eigenentwickelte MAFM mit interferometrischer Positionsmessung dargestellt. Die Mehrheit der hier erwähnten MAFM haben “*Scanning Sample*” Anordnung, was die Realisierung des Abbe-Komparatorprinzips ermöglicht, und Lichtzeiger als Lagedetektor. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, da sich zahlreiche NMI und Forschungseinrichtungen weltweit mit der Entwicklung von MAFM beschäftigen.

Forschungseinrichtung/ NMI	Gerätename	Rückführbarkeit	Messbereich x - y - z - Achse	Lage- detektor	Anordnung	Besonderheiten
AIIST/NMIJ Japan	DLI-AFM	differenzielle Interferometer in 3 Achsen	100 μm 100 μm 12 μm	Lichtzeiger	<i>Scanning Sample</i>	in der Anordnung wird Abbe-Versatz klein gehalten [156]
AIIST/NMIJ Japan	<i>Nanometro- logical</i> AFM	Interferometer in 3 Achsen	17,5 μm 17,5 μm 2,5 μm	Lichtzeiger	<i>Scanning Sample</i>	in der Anordnung wird Abbe-Versatz klein gehalten [157]
CML, ASCR Tschechien	<i>Metrological</i> AFM	6 Interferometer mit Nd:YAG-Laser	200 μm 200 μm 10 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x - y - z -Achse, Sonde: z -Achse	kommerzielles AFM und dreiachsiges Positioniersystem, deren Verschiebung und Winkelfehler der Bewegung mit 6 Interferometern gemessen wird [125]
CMI Tschechien	<i>long-range</i> SPM	3 Interferometer (2 Homodyn Michelson Interferometer in x - y -Achse und differentielle Interferometer in z - Achse)	1 cm 1 cm 35 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x - y -Achse, Sonde: z -Achse	dieser Ansatz ermöglicht einen kompakten und preiswerteren SPM-Aufbau, erstellt aus kommerziell erhältlichen Bauteilen [115]
CMS/ITRI Taiwan, TU Ilmenau Deutsch- land	TAFM	2 differenziellen Interferometer in x - y -Achse	100 μm 100 μm 6 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x - y -Achse, Sonde: z -Achse	kommerzielles AFM DI 3100M von Digital Instruments Inc. und dreiachsiges Positioniersystem, deren Verschiebung und Winkelfehler der Bewegung mit 2 differentiellen Interferometern gemessen wird; in der Anordnung wird das Abbe- Komparatorprinzip in x - y -Achse realisiert [35]
IMGC Italien	<i>Metrological</i> SPM	Heterodyn Planspiegelinterfe- rometer in x - y - Achse	30 μm 30 μm 18 μm	Lichtzeiger	<i>Scanning Sample</i>	kommerzielles AFM NanoScope von Digital Instruments Inc. und dreiachsiges Positioniersystem, deren Verschiebung mit 2 Planspiegelinterferometern gemessen wird; in der Anordnung wird vertikaler Abbe-Versatz minimiert [173]

KRISS Korea	<i>Metrological</i> AFM	Heterodyn Interferometer in x - y -Achse	100 μm 100 μm 12 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x - y -Achse, Sonde: z -Achse	kommerzielles AFM Autoprobe M5 von ThermoMicroscopes Inc. und zweiachsiger Nanoscanner, deren Verschiebung mit 2 Heterodyn Interferometern gemessen wird; in der Anordnung wird Abbe-Versatz in x - y -Achse klein gehalten [113]
KRISS Korea	MAFM	2 mehrachsige Interferometer (Zweistrahl- und Dreistrahlinterfero- meter)	200 mm 200 mm 38 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x - y -Achse, Sonde: z -Achse	duales ("coarse" und "fine") Positioniersystem, deren Verschiebung und Winkelfehler der Bewegung mit Interferometern gemessen wird; in der Anordnung wird Abbe-Versatz klein gehalten [112]
KULeuven Belgien	<i>Metrological</i> AFM	Interferometer in 3 Achsen	100 μm 100 μm 100 μm		<i>Scanning</i> <i>Sample</i>	kommerzielles AFM Dimension-Serie von Veeco Instruments Inc.; in der Anordnung wird das Abbe-Komparatorprinzip in allen Achsen realisiert [174]
LNE Frankreich	mAFM	4 differentielle Interferometer	60 μm 60 μm 15 μm	Lichtzeiger	<i>Scanning</i> <i>Sample</i>	kommerzielles AFM von Park Scientific Instruments Inc. und eigenentwickeltes Positioniersystem; in der Anordnung wird das Abbe-Komparatorprinzip realisiert [55]
METAS Schweiz	Metrologie- AFM	differentielles Jamin Interferometer in x - Achse	400 μm 70 μm 5 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x -Achse, Sonde: x - y - z -Achse	kommerzielles AFM von Digital Instruments Inc. und Doppelparallelfedertisch, deren Verschiebung mit einem Interferometer gemessen wird [148]
METAS Schweiz	neues MAFM	drei differentiellen Jamin- Interferometern	800 μm 800 μm 200 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: x - y - z -Achse, Sonde: z -Achse	das Gerät basiert auf einem 6-Achsen-Verschiebetisch; in der Anordnung wird das Abbe-Komparatorprinzip realisiert [147]
MIKES Finnland	IT-MAFM	Heterodyn Interferometer in 3 Achsen	120 μm 120 μm 16 μm	Lichtzeiger	<i>Scanning</i> <i>Sample</i>	kommerzielles AFM XE-100 von Park Systems Corp. ausgestattet mit 3 Heterodyn Interferometer; Winkelfehler des Positioniersystems mit Autokollimator gemessen wird; in der Anordnung wird das Abbe-Komparatorprinzip in allen Achsen realisiert [120, 124]

NICPV Russland	<i>Reference Interferometric Device</i>	Heterodyn Interferometer in 3 Achsen	3 μm 3 μm 1 μm		Messobjekt: <i>x-y</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	ein eigenentwickeltes AFM und Positioniersystem [167]
NIM China, TU Ilmenau Deutsch- land	SFM Veritekt A	Homodyn Interferometer in 3 Achsen	75 μm 15 μm 15 μm	Fokussensor	<i>Scanning Sample</i>	modifiziertes kommerzielles AFM Veritekt-3 [11, 16]
NIM, Tsinghua University China	<i>Metrological AFM</i>	8 Interferometer in 3 Achsen	50 mm ⁵⁰ 50 mm 2 mm	Lichtzeiger	Messobjekt: <i>x-y-z</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	ein eigenentwickeltes AFM, " <i>coarse</i> " und " <i>fine</i> " Positioniersysteme, deren Verschiebung mit Interferometern gemessen wird; Winkelfehler der Bewegung wird mit 3 Winkelsensoren gemessen; in der Anordnung wird das Abbe- Komparatorprinzip realisiert [129]
NIST USA	C-AFM	Heterodyn Interferometer in 2 Achsen	100 μm 100 μm 5 μm	piezoresis- tiver Detektor	<i>Scanning Sample</i>	kommerzielles AFM von Park Scientific Instruments Inc. und Positioniersystem mit kapazitiven Sensor in <i>z</i> -Achse [190]
NIST USA	M ³	Michelson Interferometer in 2 Achsen	50 mm 50 mm 3 mm [128]	" <i>tuning fork</i> "	Messobjekt: <i>x</i> - Achse, Sonde: <i>y-z</i> - Achse	" <i>coarse</i> " und " <i>fine</i> " Positioniersysteme in allen Achsen, deren Verschiebung in <i>x-y</i> -Achse mit Interferometern gemessen wird [121]; in der Anordnung wird Abbe-Versatz klein gehalten
NPL Groß- britannien	MAFM	differentielle Interferometer in 3 Achsen	100 μm 100 μm 5 μm	Lichtzeiger	Messobjekt: <i>x-y</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	kommerzielles AFM von Quesant Instruments Inc. und Positioniersystem; in der Anordnung wird Abbe-Versatz klein gehalten [82]
NMC Singapur, CEM Spanien	LRM-AFM	Homodyn Interferometer in 3 Achsen	25 mm 25 mm 5 mm	Lichtzeiger	Messobjekt: <i>x-y-z</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	Kombination der NMM-1 mit einem kommerziellen AFM von DME Nanotechnology GmbH [227]

⁵⁰Messfeld ist auf 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ begrenzt.

NMIA Australien	mSPM	differentielle Planspiegel Hetero- dyninterferometer in 3 Achsen	100 µm 100 µm 25 µm	“ <i>tuning fork</i> ”	<i>Scanning Sample</i>	Winkelfehler des Positioniersystems wird mit Winkelsensoren gemessen; in der Anordnung wird das Abbe- Komparatorprinzip in allen Achsen realisiert [87]
NRC/CNRC Kanada	mAFM	Homodyn Interferometer in 3 Achsen	40 mm 40 mm 6 mm	“ <i>tuning fork</i> ”	Messobjekt: <i>x-y-z</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	ein eigenentwickeltes AFM, “ <i>coarse</i> ” und “ <i>fine</i> ” Positioniersysteme, deren Verschiebung mit 3 Homodyn Interferometern gemessen wird; Winkelfehler der Bewegung wird mit 3 Autokollimatoren erfasst; in der Anordnung wird das Abbe- Komparatorprinzip realisiert [61]
PTB, TU Ilmenau Deutsch- land	SFM Veritekt	Homodyn Interferometer in 3 Achsen	75 µm 15 µm 15 µm	Fokussensor	<i>Scanning Sample</i>	modifiziertes kommerzielles AFM Veritekt-3 (Veritekt A [16], B [75], C [42]); in der Anordnung (Veritekt B, C) wird das Abbe- Komparatorprinzip in allen Achsen realisiert [11, 25, 76]
PTB Deutsch- land	LR-SFM	Homodyn Interferometer in 3 Achsen	25 mm 25 mm 5 mm	Lichtzeiger	Messobjekt: <i>x-y-z</i> -Achse, Sonde: <i>z</i> -Achse	Kombination der NMM-1 mit einem eigenentwickelten AFM [25, 43]
VSL, TU Eindhoven Niederlan- de	<i>Metrological</i> AFM	Interferometer in 3 Achsen	100 µm 100 µm 20 µm	Lichtzeiger	<i>Scanning Sample</i>	kommerzielles AFM von TopoMetrix Inc. und dreiaxsiges Positioniersystem; in der Anordnung wird das Abbe- Komparatorprinzip für alle Achsen realisiert [150]
VSL, TU Eindhoven, NanoNed Niederlan- de	<i>Metrological</i> AFM	differentielle Planspiegelinterfe- rometer in 3 Achsen	1 mm 1 mm 1 mm	Lichtzeiger	<i>Scanning Sample</i>	Kombination des eigenentwickelten Positioniersystem Nanostage3D ⁵¹ [235] mit einem eigenentwickelten AFM [181]

⁵¹<http://www.nanostage3d.com/>. Stand: November 2018.

C Anhang: FEM-Analysen verschiedener Modelle der Durchbiegung des *Cantilevers*

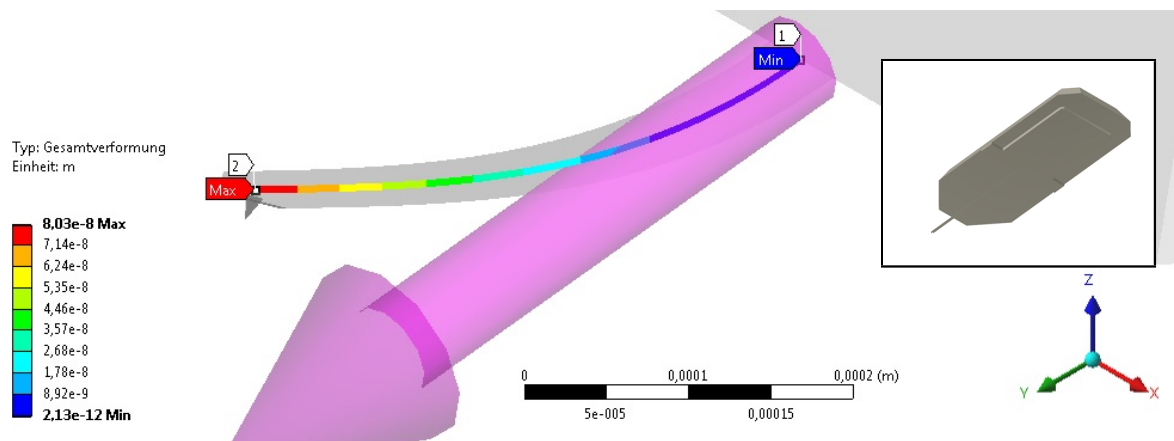


Abbildung C.1: *Cantilever* mit Trägerchip und Antastspitze

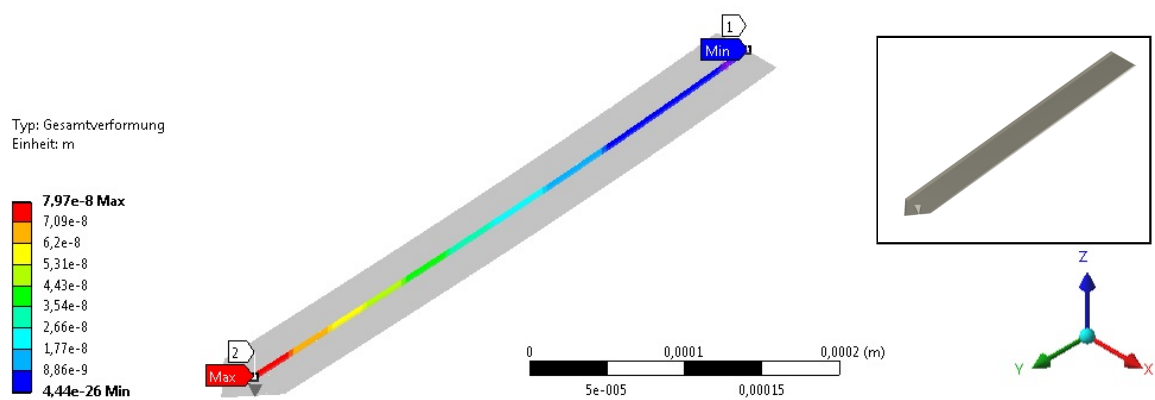


Abbildung C.2: *Cantilever* mit Antastspitze

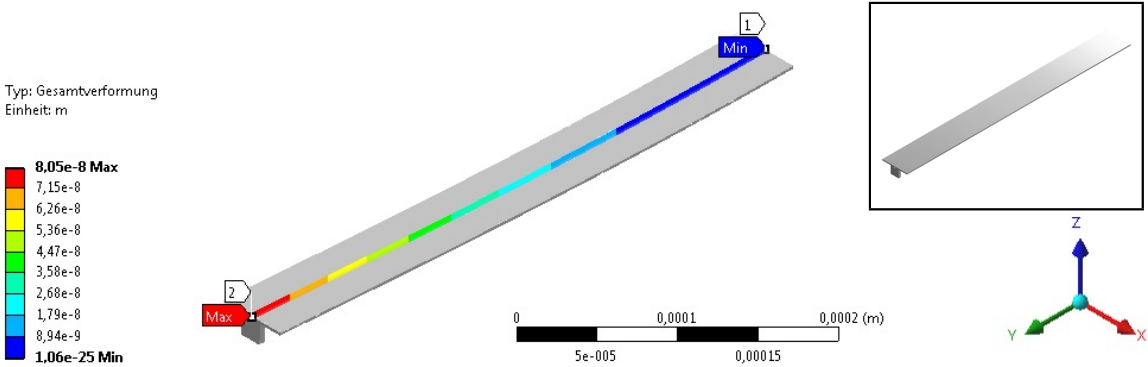


Abbildung C.3: Biegebalken mit Antastspitze

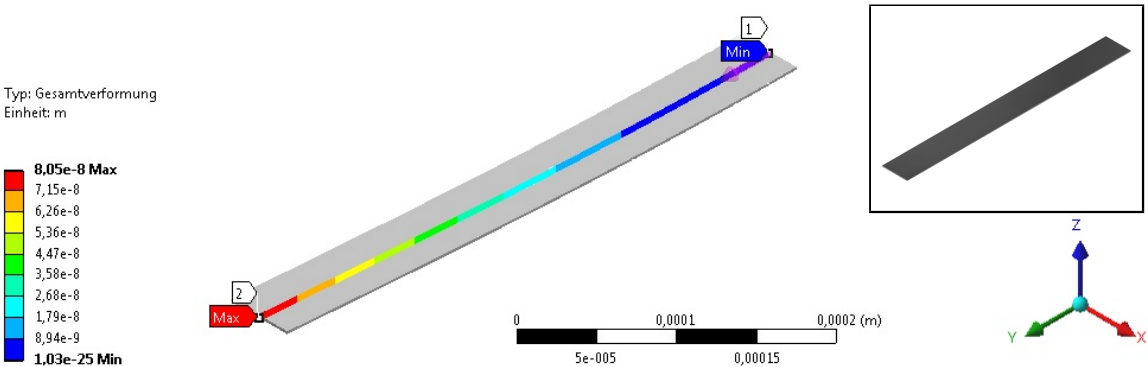


Abbildung C.4: Biegebalken

D Anhang: Gaußsche Strahltheorie

Der Laserstrahl ist im Idealfall ein Gaußstrahl [47]. Die Intensitätsverteilung $I(x,y,z)$ des Laserstrahls wird durch die Gaußverteilung beschrieben [185]:

$$I(x, y, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 e^{-2\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}} \quad (\text{D.1})$$

mit dem Intensitätsmaximum $I_0 = I(0,0,0)$ und minimalen Radius bzw. Strahltaile $w_0 = w(0)$.

Der Radius des Gaußstrahls $w(z)$ definiert sich als Abstand zur Ausbreitungsachse z bei dem die Intensität $I(0,0,z)$ um $1/e^2$ abgesunken ist. Der Ausbreitungsradius $w(z)$ in z -Richtung ist durch die Strahltaile w_0 und die Wellenlänge λ bestimmt [47]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}. \quad (\text{D.2})$$

z_R ist die Rayleigh-Länge – der Abstand von der Strahltaile w_0 in Ausbreitungsrichtung z bei welchem sich der Strahl auf $\sqrt{2}w_0$ verbreitet hat [47]:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (\text{D.3})$$

Die Transformation des Gaußstrahls durch die optischen Elemente wird in [117] behandelt. Der Durchgang des Laserstrahls durch eine dünne Linse (vgl. Abbildung D.1) kann als Transformation der Strahltaile w'_0 beschrieben werden:

$$w'_0 = \frac{f w_0}{\sqrt{z_0^2 + z_R^2}}. \quad (\text{D.4})$$

Die Entfernung z'_0 der transformierten Lasertaille von der Brennebene der Linse berechnet sich aus:

$$-z'_0 = \frac{f^2 z_0}{z_0^2 + z_R^2}. \quad (\text{D.5})$$

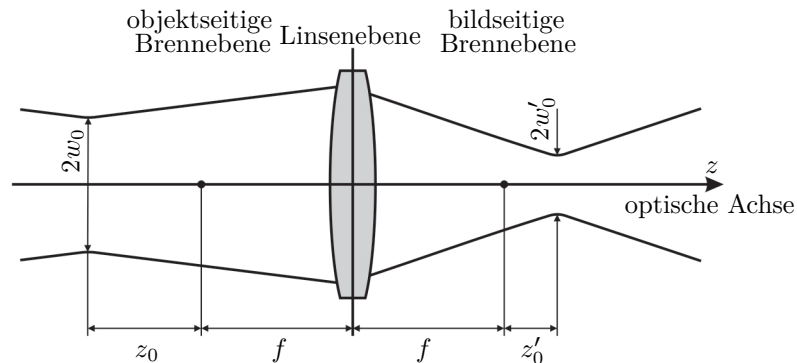


Abbildung D.1: Transformation des Gaußstrahls durch eine dünne Linse

E Anhang: Konfiguration des APC

Signalkanäle		
InputChan	= 0	Auswahl eines Eingangskanals 0...7
OutputChan	= 0	Auswahl eines Ausgangskanals 0...7
IntLowLim	= -16384	Begrenzung auf $-2^{15}/2$ Digit bzw. -5 V
IntUpLim	= +16384	Begrenzung auf $2^{15}/2$ Digit bzw. 5 V
Antastsystem		
Sensor.		
Type	= 'BeamDeflection'	Sensortyp AFM 'BeamDeflection' oder Fokussensor 'Fokussensor'
Gain	= 1	Anstieg CM 1 oder IM -1
Offset	= $\frac{k_{dz0}}{ k_{dz1} } \cdot \frac{10}{2^{15}}$	Offset k_{dz0} umgerechnet in V
Regler		
PIDController.		
EnablePID	= 1	0 Ausschaltung oder 1 Einschaltung des Reglers
SetPoint	= $\frac{\text{PSData.ForceSetPoint}}{ k_{dz1} }$	$a_{i,SP}$ – Sollwert PSData.ForceSetPoint umgerechnet in Digit
GainKp	= K_p	Proportionalbeiwert 0,12 (0,02...0,2)
GainKn	= K_i	Integrierbeiwert PID 4000 oder PI 1000 (500...25000)
GainKv	= K_d	Differenzierbeiwert PID 0,000001 oder PI 0
IntegratorLowerLimit	= $\frac{\text{IntLowLim}}{K_p \cdot K_i}$	Begrenzung des I-Anteils des PID- oder PI-Reglers
IntegratorUpperLimit	= $\frac{\text{IntUpLim}}{K_p \cdot K_i}$	
Notchfilter		
NotchFilter1., NotchFilter2.		
EnableFilter	= 1	0 Ausschaltung oder 1 Einschaltung des Filters
num(1,1)	= $n_{0,1}, n_{0,2}$	Berechnete Numeratoren n den Notchfilter 1 und 2
num(1,2)	= $n_{1,1}, n_{1,2}$	
num(1,3)	= $n_{2,1}, n_{2,2}$	
den(1,2)	= $d_{1,1}, d_{1,2}$	Berechnete Denominatoren d den Notchfilter 1 und 2
den(1,3)	= $d_{2,1}, d_{2,2}$	

Tabelle E.1: Konfigurationsparameter des in APC implementierten Reglers

F Anhang: Initialisierung des LiAFM

PSData.													
		passives Antastsystem						aktives Antastsystem					
		kdx	kdy	kdz	kpx	kpy	kpz	kdx	kdy	kdz	kpx	kpy	kpz
	0	0	0	k_{dz0}	0	0	k_{pz0}	k_{dx0}	0	k_{dz0}	0	0	k_{pz0}
a_0	1	0	0	k_{dz1}	0	0	0	0	0	k_{dz1}	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	4	0	0	0	0	0	k_{pz4}	k_{dx4}	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_3	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	13	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_5	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k_{pz16}
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_6	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_7	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
l_a	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Verteilung von Polynomkoeffizienten für die Messungen im CM

Tabelle F.1: Initialisierung des LiAFM für die Messungen mit der NMM-1

PSData.		
OptionMask	= 0	0 passives oder 2 aktives Tastsystem
MaxNegDef.x	= -40000	nicht erreichbare Größe des Grenzwertes $\leq -2^{15}$
MaxNegDef.y	= -40000	
MaxNegDef.z	$< -F_u$	gültige Größe des Auslenkungsgrenzwertes
MaxPosDef.x	= 40000	nicht erreichbare Größe des Grenzwertes $\geq 2^{15}$
MaxPosDef.y	= 40000	
MaxPosDef.z	$> F_u$	gültige Größe des Auslenkungsgrenzwertes
SprRat.x	= 1	Federkonstanten, im Falle LiAFM, 1 passives oder 0 aktives Tastsystem
SprRat.y	= 1	
SprRat.z	= 1	Federkonstante für die Berechnung der Messkraft F_m im Falle LiAFM gleicht 1
ForceLower	= F_l	untere Sicherheitsgrenze der Regelung
ForceThreshold	$< SetPoint$	Umschaltsschwelle der Regelung
ForceSetPoint	$F_l < SetPoint < F_u$	$d_{z,SP}$ – Sollwert des Kraftreglers des passiven Tastsystems
ForceUpper	= F_u	obere Sicherheitsgrenze der Regelung
ForceContKp	= K_p	Proportionalbeiwert des Kraftreglers des passiven Tastsystems
ForceContKn	= K_i	Integrierbeiwert des Kraftreglers des passiven Tastsystems
ForceFiltGain	= 0,05	Verstärkungsfaktor eines Filters für die Berechnung der Scanrichtung; wird nicht im Zusammenhang mit LiAFM benutzt
FocusSensorSum	= 5000	Parameter eines Fokussensors; werden nicht im Zusammenhang mit LiAFM benutzt
FocusSensorLower	= -2	
FocusSensorUpper	= 2	
PositionContX.SetPoint	= 0	Parameter den Positionsregler des aktiven Tastsystems in x - und y -Antastrichtungen; werden nicht im Zusammenhang mit LiAFM benutzt
PositionContX.GainKp	= 0	
PositionContX.GainKn	= 0	
PositionContY.SetPoint	= 0	
PositionContY.GainKp	= 0	
PositionContY.GainKn	= 0	
PositionContZ.SetPoint	= 0	$p_{z,SP}$ – Sollwert des Positionsreglers des aktiven Tastsystems; entspricht der Mittelstellung des Piezoschiebers; im Falle einer, durch einen zusätzlichen Offset, angepassten Kennlinie gleicht 0
PositionContZ.GainKp	= K_p	Proportionalbeiwert des Positionsreglers des aktiven Tastsystems
PositionContZ.GainKn	= K_i	Integrierbeiwert des Positionsreglers des aktiven Tastsystems

(b) Sicherheitsgrenzen und Reglerparametern

Tabelle F.1: Initialisierung des LiAFM für die Messungen mit der NMM-1

G Anhang: Brechzahlberechnung

Die Luftbrechzahlberechnung erfolgt nach den modifizierten Gleichungen von G. Bönsch und E. Potulski [22]. Die Berechnung beginnt mit der Brechzahlabhängigkeit von der Wellenzahl σ ($\sigma = \frac{1}{\lambda_0}$) in nm^{-1} bzw. Wellenlänge λ_0 ($\lambda_0 = 632,991\,234\,\text{nm}$):

$$(n_{\lambda_0} - 1) = \left(8091,37 + \frac{2333983}{130 - (1000\sigma)^2} + \frac{15518}{38,9 - (1000\sigma)^2} \right) 10^{-8}. \quad (\text{G.1})$$

Brechzahl in Abhängigkeit von CO_2 -Gehalt x_{CO_2} in ppm ($x_{\text{CO}_2} = 300\,\text{ppm}$):

$$(n_{\lambda_0, x_{\text{CO}_2}} - 1) = (n_{\lambda_0} - 1) \cdot (1 + 0,5327 \cdot 10^{-6} (x_{\text{CO}_2} - 400)). \quad (\text{G.2})$$

Brechzahl in Abhängigkeit von Lufttemperatur ϑ in $^\circ\text{C}$ und Luftdruck p in Pa:

$$n_{\lambda_0, x_{\text{CO}_2}, \vartheta, p} = \frac{(n_{\lambda_0, x_{\text{CO}_2}} - 1)p}{93214,60} \cdot \frac{1 + 10^{-8} (0,5953 - 0,009876\vartheta)p}{1 + 0,0036610\vartheta} + 1. \quad (\text{G.3})$$

Um die Brechzahl in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte RH in % berechnen zu können (vgl. Gleichung (G.5)) muss zuerst die relative Feuchte RH in Wasserdampfpartialdruck p_v in Pa umgewandelt werden. Dabei kann der Sättigungsdampfdruck p_{sv} nach der Gleichung von R.S. Davis in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur T in K ($T = \vartheta + 273,15\,\text{K}$) ermittelt werden [22, 81]:

$$p_v = 0,01\text{RH}p_{\text{sv}} = 0,01\text{RH}e^{AT^2+BT+C+\frac{D}{T}} \quad (\text{G.4})$$

mit

$$A = 1,2378847 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2},$$

$$B = -1,9121316 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1},$$

$$C = 33,93711047,$$

$$D = -6,3431645 \cdot 10^3 \text{ K}.$$

Die resultierende Luftbrechzahl:

$$n_{\lambda_0, x_{\text{CO}_2}, \vartheta, p, p_v} = n_{\lambda_0, x_{\text{CO}_2}, \vartheta, p} - p_v (3,8020 - 0,0384 (1000\sigma)^2) 10^{-10}. \quad (\text{G.5})$$

Für Wellenlänge $\lambda_0 = 632,991\,234\,\text{nm}$ und CO_2 -Gehalt $x_{\text{CO}_2} = 300\,\text{ppm}$ vereinfacht sich die Brechzahlberechnung zu:

$$n = 1 + 2,877376 \cdot 10^{-9} p \frac{1 + 10^{-8} (0,5953 - 0,009876\vartheta)p}{1 + 0,0036610\vartheta} - 3,706162 \cdot 10^{-10} p_v. \quad (\text{G.6})$$

Die Temperaturabhängigkeit der Brechzahl des optischen Glases BK7 n_{BK7} kann mittels folgender Gleichung berechnet werden [191]:

$$\frac{dn_{\text{BK7,abs}}(\lambda_{\text{norm}}, \vartheta)}{d\vartheta} = \frac{n_{\text{BK7}}^2(\lambda_{\text{norm}}, \vartheta_{\text{norm}}) - 1}{2n_{\text{BK7}}(\lambda_{\text{norm}}, \vartheta_{\text{norm}})} \left(D_0 + 2D_1\Delta\vartheta + 3D_2\Delta\vartheta^2 + \frac{E_0 + 2E_1\Delta\vartheta}{\lambda_{\text{norm}}^2 - \lambda_{\text{TK}}^2} \right) \quad (\text{G.7})$$

mit

$$n_{\text{BK7}}(\lambda_{\text{norm}}, \vartheta_{\text{norm}}) = n_{\text{BK7}} = 1,51509,$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{\text{norm}} = \vartheta - 20^\circ\text{C},$$

$$D_0 = 1,86 \cdot 10^{-6},$$

$$D_1 = 1,31 \cdot 10^{-8},$$

$$D_2 = -1,37 \cdot 10^{-11},$$

$$E_0 = 4,34 \cdot 10^{-7},$$

$$E_1 = 6,27 \cdot 10^{-10},$$

$$\lambda_{\text{TK}} = 0,17 \mu\text{m}.$$

H Anhang: Herleitung der Berechnungsgleichung der Messlänge unter Berücksichtigung der Totstrecke

Die Änderung der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ im Interferometer des Sondenmesssystems unter Berücksichtigung der Vorzeichendefinition kann durch die Differenz der optischen Längen von Mess- und Referenzarm zu Beginn (Position A) und am Ende (Position B) der interferometrischen Messung durch folgende Gleichung [177] ausgedrückt werden:

$$\Delta\varphi = \left[\sum_i (l_{\text{ref,B},i} n_{\text{B},i}) - \sum_j (l_{\text{mes,B},j} n_{\text{B},j}) \right] \frac{2 \cdot 2\pi}{\lambda_{0\text{B}}} - \left[\sum_i (l_{\text{ref,A},i} n_{\text{A},i}) - \sum_j (l_{\text{mes,A},j} n_{\text{A},j}) \right] \frac{2 \cdot 2\pi}{\lambda_{0\text{A}}}. \quad (\text{H.1})$$

Beim Nullen des Zählers des Interferometers zu Beginn der Messung (Zeitpunkt $t = 0$, Position A) sind die geometrischen Längen des Mess- und Referenzarm gleich: $l_{\text{mes}} = l_{\text{ref}} = l_0$. Am Ende der Messung (Zeitpunkt t , Position B) bleibt die Referenzarmlänge gleich: $l_{\text{ref}} = l_0$ und die Messarmlänge ändert sich zu: $l_{\text{mes}} = l_0 - l_{\text{m}}$. Unter der Annahme, dass die Vakuumwellenlänge konstant bleibt: $\lambda_{0\text{A}} = \lambda_{0\text{B}} = \lambda_0$ und Berücksichtigung der Glasstrecke im Messarm $l_{\text{g}} = l_{\text{t}}$ erhält man die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\varphi\lambda_0}{2 \cdot 2\pi} &= [l_0 n(t) - [(l_0 - l_{\text{m}} - l_{\text{t}} (1 + \alpha_{\text{BK7}} \Delta\vartheta)) n(t) + l_{\text{t}} (1 + \alpha_{\text{BK7}} \Delta\vartheta) n_{\text{BK7}}(t)]] \\ &\quad - [l_0 n(0) - [(l_0 - l_{\text{t}}) n(0) + l_{\text{t}} n_{\text{BK7}}(0)]] \\ &= n(t) \left[l_{\text{m}} - l_{\text{t}} \left(\frac{n(0)}{n(t)} - 1 \right) - l_{\text{t}} \alpha_{\text{BK7}} \Delta\vartheta \left(\frac{n_{\text{BK7}}(t)}{n(t)} - 1 \right) - l_{\text{t}} \left(\frac{n_{\text{BK7}}(t) - n_{\text{BK7}}(0)}{n(t)} \right) \right]. \end{aligned} \quad (\text{H.2})$$

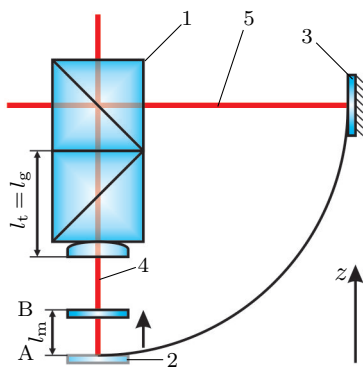


Abbildung H.1: Totstrecke (1 PT, 2 *Cantilever* bzw. Messspiegel, 3 Referenzspiegel, 4 Messstrahl, 5 Referenzstrahl)

Die Gleichung (H.2) kann dann nach der Messlänge l_m umgestellt werden (vgl. Gleichung (H.3)).

$$l_{m,k}(t) = \underbrace{\frac{\Delta\varphi\lambda_0}{2 \cdot 2\pi n(t)}}_{\text{Messergebnis ohne Totstrecke}} + \overbrace{l_t \left(\frac{n(0)}{n(t)} - 1 \right)}^{l_{m,l}(t)} + \underbrace{l_t \alpha_{BK7} \Delta\vartheta \left(\frac{n_{BK7}(t)}{n(t)} - 1 \right)}_{\text{Ausdehnung des Glases}} + \underbrace{l_t \left(\frac{n_{BK7}(t) - n_{BK7}(0)}{n(t)} \right)}_{\text{Brechzahländerung des Glases}}. \quad (H.3)$$

I Anhang: Bestimmung von Sensitivitätskoeffizienten

Ausgehend von Gleichung (8.10), S. 101 und nach dem Einsetzen der Gleichungen (8.12)–(8.14), S. 102 in obengenannte Gleichung kann das Messergebnis h entsprechend der Modellgleichung (I.1) berechnet werden:

Zur Ermittlung der Sensitivitätskoeffizienten c_i werden die partielle Ableitungen $\frac{\partial h}{\partial x_i}$ nach folgenden Einflussgrößen x_i analytisch berechnet:

- Kalibrierkoeffizient $k_{d_{x4}}$ – Gleichung (I.2),
- Luftbrechzahl bei Normalbedingungen n_{norm} – Gleichung (I.3),
- A/D-Wandlerwert a_1 – Gleichung (I.4),
- Differenzwert Δa_1 – Gleichung (I.5)
- Totstrecke l_t – Gleichung (I.6),
- Messbereichfaktor $k_{\text{SM-04}}$ der Schwingungsmesskarte SM-04 – Gleichung (I.7),
- Ausdehnungskoeffizient α_{BK7} des Glases – Gleichung (I.8) sowie,
- Wegdifferenz Δl_z – Gleichung (I.9).

Die Berechnungen der partiellen Ableitungen nach den Umweltparametern ($\vartheta(0)$, $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$, $p(0)$, Δp_1 , Δp_2 , $\text{RH}(0)$, ΔRH_1 und ΔRH_2) erfolgen softwaregestützt (PTC[®] Mathcad) mittels numerischen Methoden.

$$\begin{aligned}
h = k_{d_{x4}} \left[n_{\text{norm}} \left(\frac{a_1(t1) + \Delta a_1}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - \frac{a_1(t1)}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \right) \right. \\
+ \frac{2^{15} l_t}{10 k_{\text{SM-04}}} \left(\frac{n(\vartheta(0), p(0), \text{RH}(0))}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - \frac{n(\vartheta(0), p(0), \text{RH}(0))}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \right) \\
+ \alpha_{\text{BK7}} [\Delta\vartheta_1 + \Delta\vartheta_2] \left(\frac{n_{\text{BK7}}(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2)}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - 1 \right) \\
+ \frac{n_{\text{BK7}}(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2) - n_{\text{BK7}}(\vartheta(0))}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} \\
- \alpha_{\text{BK7}} \Delta\vartheta_1 \left(\frac{n_{\text{BK7}}(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1)}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} - 1 \right) - \frac{n_{\text{BK7}}(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1) - n_{\text{BK7}}(\vartheta(0))}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \left. \right] - \Delta l_z,
\end{aligned} \tag{I.1}$$

$$\frac{\partial h}{\partial k_{d_{x4}}} = \frac{h + \Delta l_z}{k_{d_{x4}}}, \tag{I.2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial n_{\text{norm}}} = k_{d_{x4}} \left(\frac{a_1(t1) + \Delta a_1}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - \frac{a_1(t1)}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \right), \tag{I.3}$$

$$\frac{\partial h}{\partial a_1(t1)} = k_{d_{x4}} n_{\text{norm}} \left(\frac{1}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - \frac{1}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \right), \tag{I.4}$$

$$\frac{\partial h}{\partial \Delta a_1} = \frac{k_{d_{x4}} n_{\text{norm}}}{n(\vartheta(0), \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)}, \tag{I.5}$$

$$\frac{\partial h}{\partial l_t} = \frac{1}{l_t} \left[h + \Delta l_z - k_{d_x 4} n_{\text{norm}} \left(\frac{a_1(t1) + \Delta a_1}{n(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, \Delta \vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - \frac{a_1(t1)}{n(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \right) \right], \quad (\text{I.6})$$

$$\frac{\partial h}{\partial k_{\text{SM-04}}} = \frac{1}{k_{\text{SM-04}}} \left[k_{d_x 4} n_{\text{norm}} \left(\frac{a_1(t1) + \Delta a_1}{n(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, \Delta \vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - \frac{a_1(t1)}{n(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} \right) - (h + \Delta l_z) \right], \quad (\text{I.7})$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha_{\text{BK7}}} = \frac{k_{d_x 4} 2^{15} l_t}{10 k_{\text{SM-04}}} \left[[\Delta \vartheta_1 + \Delta \vartheta_2] \left(\frac{n_{\text{BK7}}(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, \Delta \vartheta_2)}{n(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, \Delta \vartheta_2, p(0), \Delta p_1, \Delta p_2, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1, \Delta \text{RH}_2)} - 1 \right) - \Delta \vartheta_1 \left(\frac{n_{\text{BK7}}(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1)}{n(\vartheta(0), \Delta \vartheta_1, p(0), \Delta p_1, \text{RH}(0), \Delta \text{RH}_1)} - 1 \right) \right], \quad (\text{I.8})$$

$$\frac{\partial h}{\partial \Delta l_z} = -1. \quad (\text{I.9})$$

